



HAL
open science

Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône à l'aide des modèles numériques Mage et Adis-TS

E. Andries, B. Camenen, J.B. Faure, Jérôme Le Coz, M. Launay

► **To cite this version:**

E. Andries, B. Camenen, J.B. Faure, Jérôme Le Coz, M. Launay. Modélisation hydro-sédimentaire du Rhône à l'aide des modèles numériques Mage et Adis-TS. [Rapport de recherche] irstea. 2012, pp.73. hal-02597381

HAL Id: hal-02597381

<https://hal.inrae.fr/hal-02597381>

Submitted on 15 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



MODÉLISATION HYDRO-SÉDIMENTAIRE DU RHÔNE À L'AIDE DES MODÈLES NUMÉRIQUES MAGE ET ADIS-TS

Auteurs :

E. Andries, B. Camenen, J.-B. Faure, J. Le Coz, M. Launay
Irstea Lyon, Unité de Recherche Hydraulique Hydrologie



Partenaires au sein de l'Action :



TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction.....	6
1.1	Contexte de l'Étude.....	6
1.1.1	Projet Axelera PCB.....	6
1.1.2	Travail réalisé par Irstea.....	6
1.2	Les PCB (PolyChloroBiphényles).....	8
2	Le Rhône.....	10
2.1	Hydrologie.....	11
2.2	Transport solide et sédimentaire.....	13
2.2.1	Transit par suspension.....	14
2.2.2	Transit par charriage.....	15
3	Chasses du Rhône à l'aval de Genève.....	17
3.1	Introduction.....	17
3.2	Historique des chasses.....	18
3.3	Cadre administratif de la chasse de mai 2012.....	19
4	Mode de gestion des ouvrages du Rhône.....	21
4.1	Objectifs.....	21
4.2	Principe de gestion des plans d'eau.....	21
5	La modélisation hydro-sédimentaire du Rhône.....	24
5.1	Modèle hydraulique 1D : Mage.....	24
5.2	Modèle 1D d'advection-diffusion : Adis-TS.....	25
5.2.1	Description générale du modèle.....	25
5.2.2	Calcul des termes sources pour un lit composé.....	25
5.2.3	Calcul du coefficient de dispersion.....	26
5.3	Site pilote de Miribel-jonage.....	27
5.4	Site pilote de la lône du beurre.....	28
5.5	Modèle du Rhône de la frontière Suisse à l'Isère.....	29
6	Recueil des données.....	30
6.1	Données topographiques et bathymétriques.....	30
6.1.1	Origine des données.....	30
6.1.2	Problèmes et limites.....	30
6.2	Données hydrologiques.....	32
6.2.1	Conditions aux limites entrantes.....	32
6.2.2	Apports ponctuels.....	35
6.2.3	Condition à la limite aval.....	36
6.3	Données sédimentaires.....	36
6.3.1	Caractéristiques des sédiments.....	37
6.3.2	Concentration sédimentaire.....	37
7	Mise en place du modèle hydraulique : paramétrisation.....	39
7.1	Présentation.....	39
7.2	Coefficients de Strickler.....	40
7.3	Répartition des débits aux diffluences.....	41
7.3.1	Répartition des débits pilotée par un barrage.....	42
7.3.2	Répartition des débits à une diffluence « naturelle ».....	43
7.4	Les casiers de stockage.....	43
7.5	Les ouvrages hydrauliques.....	43

7.5.1	Modélisation des ouvrages.....	43
7.5.2	Consignes d'exploitations.....	45
7.5.3	Débits d'aménagement.....	45
8	Exemple de résultats obtenus avec PamHyr Mage.....	46
8.1	Ligne d'eau.....	46
8.2	Comparaison de lignes d'eau.....	47
8.3	Hydrogramme : propagation d'une crue.....	47
9	Modélisation du transport de sédiments fins : paramétrisation.....	49
9.1	Principales caractéristiques.....	49
9.1.1	Type de sédiments.....	49
9.1.2	Diamètre moyen.....	49
9.1.3	Masse volumique.....	49
9.1.4	Porosité.....	50
9.2	Coefficient cinétique de disparition du soluté.....	50
9.3	Coefficients de diffusion.....	50
9.4	Conditions aux limites et Conditions initiales.....	51
9.4.1	Conditions aux limites et apports ponctuels.....	51
9.4.2	Conditions initiales.....	51
10	Simulations et résultats hydro-sédimentaires.....	52
10.1	Simulation 1 : État de référence, apports constants en débit et en MES.....	52
10.1.1	Apports en eau et en MES.....	52
10.1.2	Résultats.....	52
10.2	Simulation 2 : Pollution sur un affluent et diffusion.....	55
10.2.1	Apports du Rhône en eau et en MES.....	55
10.2.2	Résultats.....	55
10.3	Simulation 3 : Chasse de 2003.....	56
10.3.1	Apports du Rhône en eau et en MES.....	57
10.3.2	Premiers résultats et calage.....	59
10.3.3	Résultats, dépôts et concentrations.....	63
11	Conclusions.....	67
11.1	Conclusion sur le nouveau logiciel de transport de sédiments, Adis-TS.....	67
11.2	Conclusion sur le modèle du Rhône amont	67
11.3	Perspectives.....	67
11.3.1	Amélioration du modèle.....	67
11.3.2	Améliorations hydrauliques.....	68
11.3.3	Améliorations sédimentaires.....	68
12	Références.....	70
13	Annexes.....	72
13.1	Coefficients de Strickler utilisés sur l'ensemble du modèle.....	72

INDEX DES TABLES

Tableau 1: Coefficients a, b et c pour les formules du coefficients de dispersion.	26
Tableau 2: Liste des données disponibles pour le Rhône , l'Ain et la Saône et ses affluents, de l'amont à l'aval, présents sur la zone d'étude.....	32

Tableau 3 : Débits caractéristiques du Rhône à Pougny (loi de Galton - janvier à décembre) - données calculées sur 86 ans.....	33
Tableau 4 : Débits caractéristiques de l'Ain au Pont de Port Galland (loi de Galton - janvier à décembre) - données calculées sur 53 ans.....	34
Tableau 5 : Débits caractéristiques de la Saône à Couzon-Au-Mont-d'Or.....	35
Tableau 6: Liste des données disponibles pour les affluents du Rhône de l'amont à l'aval, présents sur la zone d'étude à l'exception de l'Ain et la Saône présentés au tableau 5, ainsi que leurs apports ponctuels définis pour le modèle (Données issues de la Banque Hydro).....	36
Tableau 7: Frottements définis pour le tronçon du canal de Miribel aval.....	40
Tableau 8 : Les différents types d'ouvrages modélisés.....	44
Tableau 9: Liste et caractéristiques des ouvrages présent sur la partie du Rhône modélisé (les lois de modélisation sont présentées dans le Tab. 8).....	44
Tableau 10: Débits d'aménagements de la CNR.....	45
Tableau 11: Caractéristiques des sédiments du Rhône à Jons utilisés pour la modélisation.....	50
Tableau 12: Strickler utilisés en fonction des pk et des biefs.....	72

INDEX DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Localisation des sites pilotes et principaux ouvrages du Rhône aux alentours, (Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône, Institution Interdépartementale des bassins Rhône-Saône).....	8
Figure 2: Structure chimique des polychlorobiphényles, source Wikipédia.....	9
Figure 3: Carte des aménagements du Rhône, CNR.....	10
Figure 4: Le Rhône à Beaucaire, Banque Hydro.....	11
Figure 5: Le Rhône à Pougny, Banque Hydro.....	12
Figure 6: Débits de pointes des affluents du Rhône pour les crues de période de retour 10, 100 et 1000 ans. Étude Globale du Rhône - Territoire Rhône.....	12
Figure 7 : Aménagements hydroélectriques sur le Rhône français, Hydratec.....	13
Figure 8 : Apports solides transportés par charriage jusqu'au Rhône (Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône, Institution Interdépartementale des bassins Rhône - Saône).....	14
Figure 9 : Évolution du transit naturel par suspension, IRS - Sogreah 2000, mise en forme Hydratec/MINEA.....	15
Figure 10: Evolution du charriage, IRS - Sogreah 2000, mise en forme Hydratec/MINEA - Étude globale des crues du Rhône - volet "Dynamique fluviale".....	16
Figure 11 : Confluence du Rhône (à gauche) et de l'Arve (à droite) chargée en sédiments à Genève. Photo : SIG, crue de l'Arve, août 2005.....	17
Figure 12: Abaissement des plans d'eau de Verbois, Chancy-Pougny et Génissiat	20
Figure 13 : Aménagement de Pierre-Bénite, exemple de consigne d'exploitation à un point de réglage. courbe hauteur/débit, CNR.....	22
Figure 14: Basculement du plan d'eau lors d'une crue, ZABR.....	23
Figure 15: Représentation schématique d'une rivière à lits composés. Les indices m et M correspondent respectivement au lit mineur et lit majeur.....	25
Figure 16 : Localisation (a) et description du site pilote de Miribel-Jonage (Geoportail).....	27
Figure 17 : Localisation (a) et description (b) du site pilote de la lône du Beurre (Geoportail).....	28

Figure 18: Représentation géométrique du modèle 1D du Rhone entre la frontière et Motz (a) en coordonnées relatives (abscisses/cotes) et avant ajout des nouvelles données, (b) en coordonnées géoréférencées xyz après ajout des nouvelles données.	31
Figure 19 : Écoulements moyens mensuels du Rhône à Pougny. Données calculées sur 86 ans, Banque HYDRO.....	33
Figure 20 : Écoulements moyens mensuels de l'Ain au Pont de Port Galland. Données calculées sur 53 ans. Banque HYDRO.....	34
Figure 21: Écoulements moyens mensuels en m ³ /s de la Saône à Couzon-Au-Mont-d'Or.....	35
Figure 22: Distribution granulométrique des MES à Jons lors de la chasse de 2003 (données CNR)	37
Figure 23: Relation entre les mesures de concentrations et débit sur le Rhône en amont de Lyon et sur la Saône à Lyon.....	38
Figure 24: Schéma global du Rhone modélisé sous PamHyr.....	39
Figure 25: profil en long du tronçon et frottements associés, canal de Miribel aval.....	41
Figure 26: Aménagement classique du Rhône, (Institution interdépartementale des bassins Rhône-Saône).....	42
Figure 27: Ligne d'eau de 5 biefs du Rhône obtenue sous PamHyr après calcul par Mage.....	46
Figure 28: Comparaison de lignes d'eau mesurées et calculées par Mage pour différents débits, sur le Rhône au niveau de la lône du Beurre.....	47
Figure 29: Hydrogrammes issus de Pamhyr-Mage de la propagation d'une crue.....	48
Figure 30: Masses de sédiments déposées en kg/m ² pour la simulation 1 sur tout le linéaire du Rhône modélisé (a) et sur les biefs où l'on observe des masses de sédiments déposées (b).....	53
Figure 31: cartes représentant les zones où l'on retrouve les forts dépôts.....	54
Figure 32: Masses de sédiments déposées en kg/m ² pour la simulation 3 sur tout le linéaire du Rhône modélisé (a) et sur les biefs où l'on observe des masses de sédiments déposées (b).....	56
Figure 33: Débits mesurés à Chancy Pougny pendant la chasse de mai 2003 (la cote correspond à une mesure dans la retenue au barrage de Génissiat).....	57
Figure 34: Concentrations mesurées à Pougny (a) et à Seyssel (b) lors de la chasse de 2003.....	58
Figure 35: Concentration en MES et débit utilisés pour la simulation de la chasse à la limite amont du modèle.....	59
Figure 36: Comparaison entre la concentration en MES mesurée et calculée à Miribel Jonage pour deux valeurs du coefficient ac différents sur la chasse de 2003.....	60
Figure 37: Comparaison entre la concentration en MES mesurée et calculée à Miribel Jonage pour deux valeurs du coefficient apd différents sur la chasse de 2003.....	61
Figure 38: Comparaison entre la concentration en MES mesurée et calculée à Seyssel pour la chasse de 2003 (apd = 0,2 et ac = 0,0005).....	62
Figure 39: Masses de sédiments déposées en kg/m ² sur tout le linéaire du Rhône modélisé, simulation 2.....	63
Figure 40: Propagation du pic de MES de l'amont (Suisse) à l'aval (confluence avec Isère) du Rhône.....	64
Figure 41: Propagation au sein d'un aménagement classique du Rhône.....	65
Figure 42: Influence sur la concentration en MES des barrages et aménagements hydrauliques, lors d'une chasse.....	66

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE

1.1.1 PROJET AXELERA PCB

Le travail qui suit prend place au sein du programme Axelera, pôle de compétitivité à vocation mondiale « Chimie et Environnement Lyon & Rhône-Alpes », créé en 2005 par Arkema, le CNRS, GDF SUEZ, l'IFP Energies nouvelles et Rhodia.

Pour devenir le pôle industriel et scientifique leader européen en 2012, vitrine de l'innovation en chimie-environnement, Axelera rassemble et coordonne les acteurs de l'industrie, de la recherche et de la formation en chimie et en environnement. Sa stratégie de développement est axée sur 5 thématiques :

- la chimie-environnement au service des marchés d'application,
- la préservation des espaces naturels,
- le recyclage et la recyclabilité des matériaux,
- la chimie issue du végétal,
- l'usine du futur.

L'un des nombreux projets portés par Axelera, le projet PCB, a pour but le développement de moyens pour lutter contre la pollution du Rhône par les PCB. Le programme PCB-Axelera a été engagé en décembre 2008 par le ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, qui a confié au pôle de compétitivité Axelera le volet de recherche appliquée sur les techniques de dépollution de son plan national d'actions sur les PCB. Le programme de recherche PCB-Axelera, d'une durée de 40 mois et piloté par Suez Environnement, mobilise au total 30 partenaires autour de 16 actions. Le mois d'avril 2009 a marqué le coup d'envoi des 16 actions qui permettront à terme de fournir des solutions de dépollution efficaces des PCB dans les rivières.

L'action dans laquelle prend place notre étude, est intitulée : « Flux de PCB associés à la dynamique à différentes échelles des phénomènes de transport, de dépôts et de remise en suspension des sédiments fins. Application aux spécificités du Rhône. »

1.1.2 TRAVAIL RÉALISÉ PAR IRSTEA

Cette action vise à mettre à profit les avancées récentes de la modélisation numérique hydro-sédimentaire pour analyser la dynamique des transferts de PCB dans les eaux et les sédiments fins d'un cours d'eau, à différentes échelles spatiales (de quelques centaines de mètres à plusieurs centaines de kilomètres). Les modalités de stockage et de reprise des sédiments fins sont examinées (casiers, zones situées entre les épis, îlots, etc.) sur la base d'analyses des volumes stockés dans les marges alluviales, et des effets de dépôt/reprise dans les retenues et les casiers. La modélisation est réalisée par des approches adaptées aux différentes échelles :

- une échelle globale à l'aide d'un modèle 1D permettant une modélisation du flux sédimentaire en MES sur le réseau hydrographique du Rhône,

- une échelle locale à l'aide d'un modèle 2D (voire 3D pour certains cas tests), permettant une analyse des processus hydrosédimentaires locaux et la modélisation détaillée d'un ou deux site(s) pilote(s).

Une partie importante du travail consiste à obtenir les données nécessaires, en particulier la caractérisation des zones sources, puis des mesures hydrosédimentaires détaillées sur le site (topographie, qualité des sédiments, hydrométrie, concentrations), d'une part pour fournir les données d'entrées et d'autre part pour caler et valider les modèles. Le modèle 1D fournit les conditions aux limites du modèle 2D. Inversement, les résultats du modèle 2D permettent d'appréhender les termes « globaux » de dépôts/érosion à intégrer dans le modèle 1D.

L'estimation des quantités de PCB stockées dans les sédiments et des flux associés nécessite la connaissance des mécanismes de stockage et de transfert des sédiments fins dans le lit du Rhône, dans les casiers, les retenues ou dans les bras secondaires. Des mesures quantitatives, tant concernant le sédiment (évolution des dépôts, concentrations et flux de MES) que la présence de PCB, sont indispensables mais, par leur aspect ponctuel, ne suffisent pas pour appréhender le système dans toute sa complexité spatiale et temporelle.

À une échelle globale, la modélisation 1D permet d'évaluer la migration progressive vers l'aval des stocks sédimentaires et les temps de transit des sédiments fins contaminés. À une échelle fine (représentation très détaillée de la topo-bathymétrie) la modélisation 2D et 3D permet de bien appréhender les processus physiques de stockage/déstockage, les zones préférentielles de dépôt des sédiments dans la section d'écoulement, qu'il s'agisse du lit mineur ou du lit majeur et les effets des structures naturelles et artificielles sur la dynamique des MES et des PCB.

La modélisation 1D et le nouveau logiciel de transport de sédiments développé par Irstea pour réaliser cette étude présentent l'avantage d'une résolution rapide ce qui permet de simuler des événements de longue durée (plusieurs années et dizaines d'années) sur un long bief (plusieurs centaines de kilomètres).

Le travail effectué par Irstea consiste à mettre au point un modèle 1D représentant le transport de sédiment sur le Rhône sur le long terme, ainsi que réaliser l'étude de deux sites pilotes :

- La lône du beurre, situé à quelques kilomètres à l'aval de Vienne;
- Miribel Jonage, situé dans la partie Nord de l'agglomération Lyonnaise.

Les études sur les deux sites pilotes sont détaillées dans deux autres rapports, bien qu'abordées ici. Le travail présenté ici porte sur la modélisation du transport de sédiments dans le Rhône de la frontière Suisse à la confluence entre le Rhône et l'Isère (amont proche de Valence).

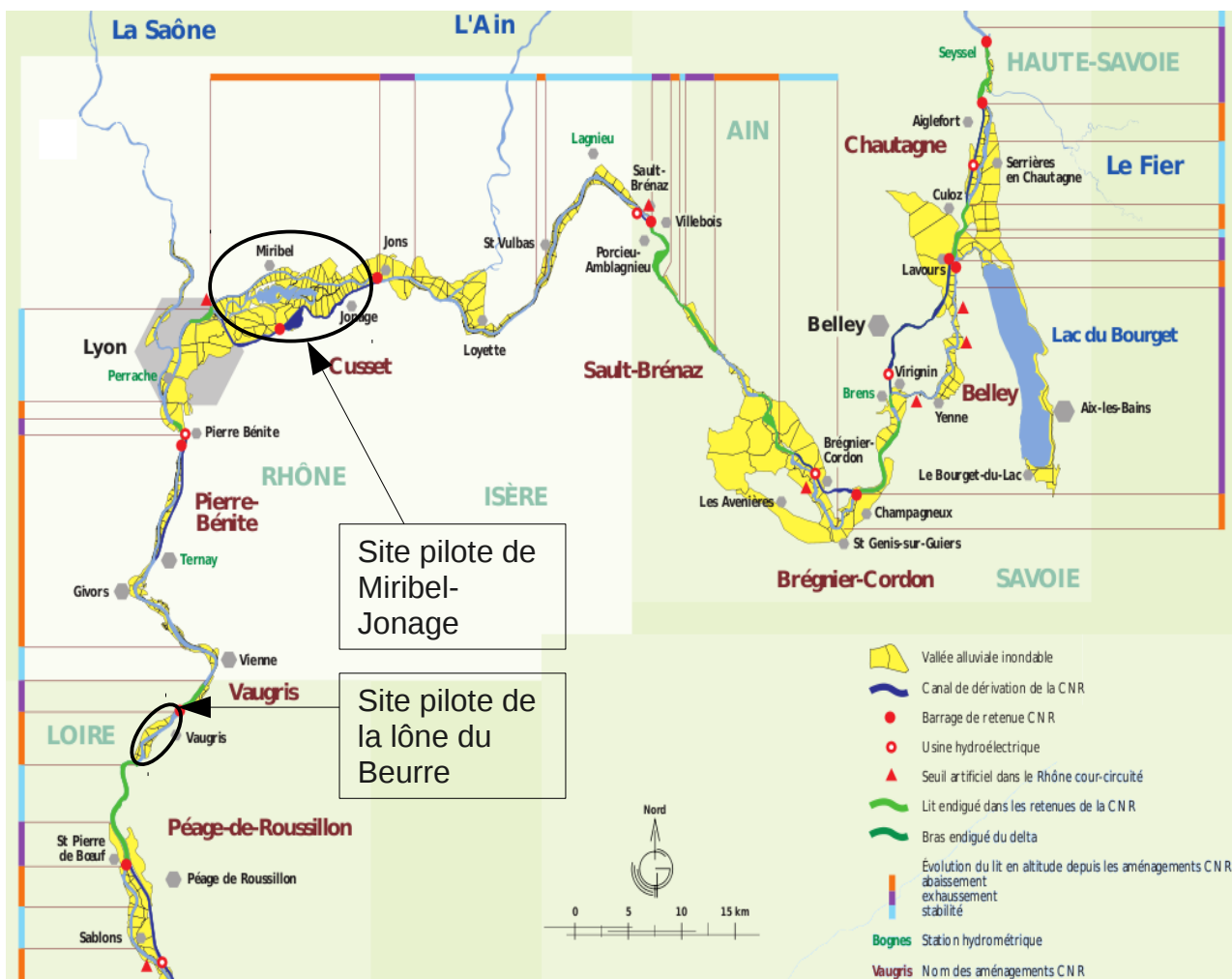


Figure 1: Localisation des sites pilotes et principaux ouvrages du Rhône aux alentours, (Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône, Institution Interdépartementale des bassins Rhône-Saône).

1.2 LES PCB (POLYCHLOROBIPHÉNYLES)

Les PCB sont des dérivés composés chimiques de la famille des dérivés chlorés. Ce sont (selon leur teneur en chlore) des liquides plus ou moins visqueux voire résineux, non solubles dans l'eau, incolores ou jaunâtres, à forte odeur aromatique. Thermodynamiquement très stables, ils ne se décomposent qu'à des températures dépassant 1 000 °C. Très liposolubles, ils font partie des contaminants bioaccumulables fréquemment trouvés dans les tissus gras chez l'humain (par exemple dans le lait maternel). Ils sont classés comme « cancérogènes probables » et le PCB 126 a été classé cancérogène certain. L'alimentation est la première source d'exposition aux PCB : 90 % de l'exposition totale, surtout via des produits d'origine animale (poisson, viande, œufs, produits laitiers).

Les PCB n'existent pas à l'état naturel. Très utilisés à partir des années 1930 dans l'industrie pour leurs qualités d'isolation électrique, de lubrification et d'ininflammabilité, ils ont été utilisés dans de nombreuses applications domestiques et industrielles.

On les retrouvait notamment comme isolants dans les transformateurs électriques et les condensateurs, comme lubrifiants dans les turbines et les pompes ou comme composants d'huiles, de soudure, d'adhésifs, de peintures et de papiers autocopiants. Ils ont cessé d'être produits depuis 1987 pour progressivement être retirés de la vente.

La quantité totale de PCB non détruits est inconnue, mais il en existe des stocks importants et un volume très significatif déjà diffusé dans l'environnement. À titre d'exemple, l'Union Européenne a estimé en 1994 qu'il en restait 200 000 tonnes (liquide) dans l'Europe des 15 (rien que venant des transformateurs et condensateurs à détruire). La France, puis l'Italie et l'Allemagne en détenaient la plus grande quantité (avec respectivement 45 000 t, 45 000 t et 30 000 t) alors que la Grèce, le Portugal et l'Irlande semblaient disposer des plus petites quantités.

Les PCB peuvent aussi être aéroportés (on en trouve dans l'air et sur les feuilles). À partir de l'air ou des sols, ils semblent surtout véhiculés par l'eau à cause de leur faible solubilité et biodégradabilité. Les PCB n'altèrent pas la qualité de l'eau en elle-même, mais se fixent sur les matières en suspension et les sédiments fins présents dans les milieux aquatiques. Les 6 millions de mètres cubes de sédiments transportés par les cours d'eau en France sont contaminés par les rejets industriels et urbains¹.

C'est pourquoi il est important de comprendre les processus de transferts des sédiments, pour connaître le devenir des PCB et leurs éventuels lieux de stockage naturels.

Il s'agit donc, d'une part, de déterminer la dynamique des phénomènes de transport, de dépôt et de remise en suspension des sédiments fins grâce à la modélisation, et d'autre part d'acquérir la connaissance des flux de PCB observés dans le Rhône.

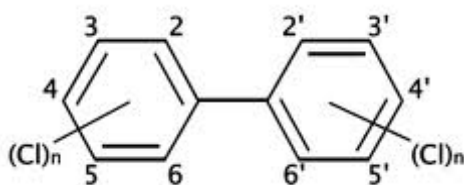


Figure 2: Structure chimique des polychlorobiphényles, source Wikipédia

1 Source Wikipédia, avril 2012

2 LE RHÔNE

Le Rhône prend sa source dans le glacier du Rhône en Suisse. Il parcourt ainsi 290 km jusqu'à la frontière franco-suisse. Après 545 km sur le territoire français, il se jette dans la Mer Méditerranée au niveau du delta de Camargue (Figure 3).

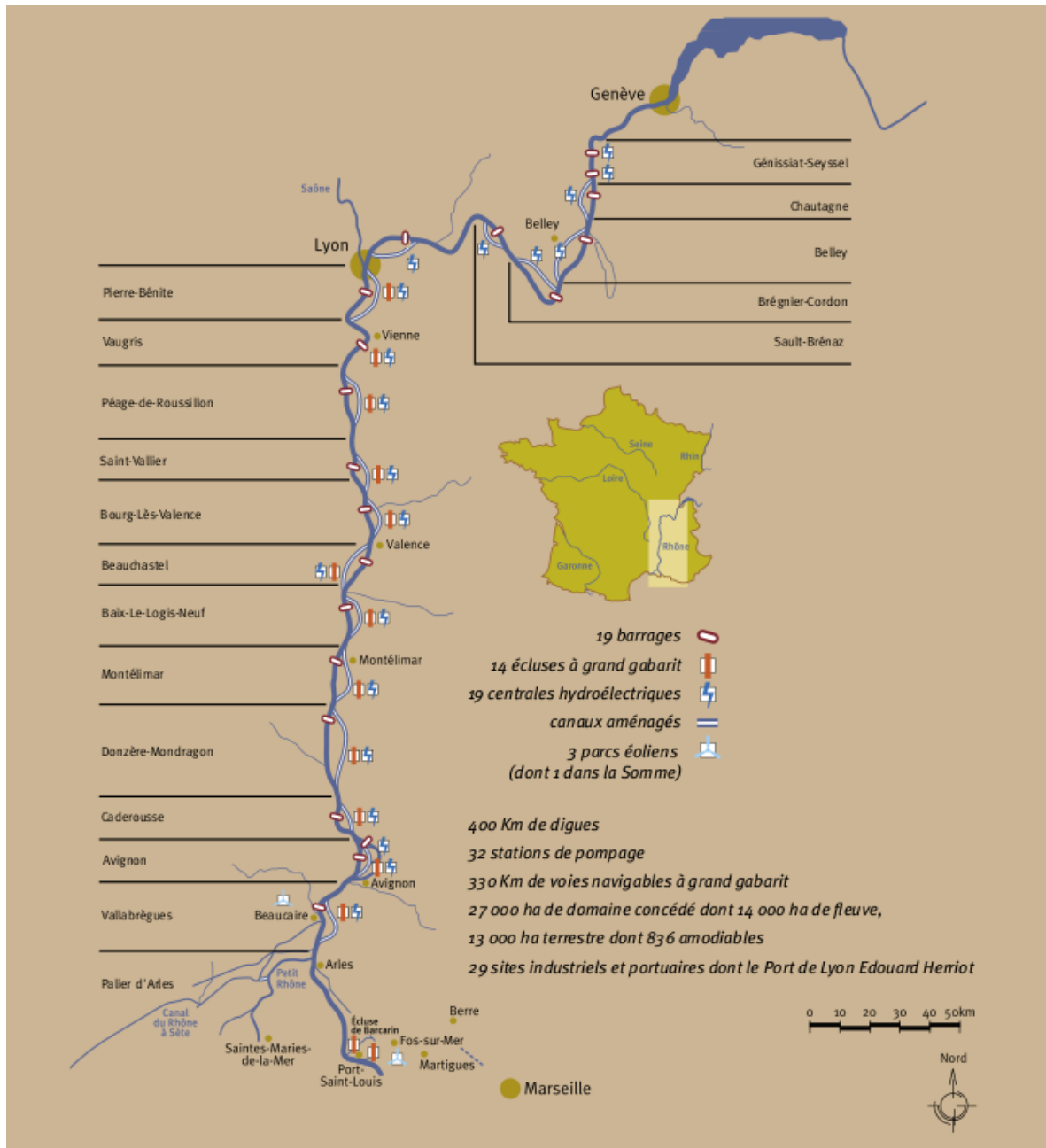


Figure 3: Carte des aménagements du Rhône, CNR

Le Rhône est caractérisé par de nombreux aménagements hydroélectriques (Figure 3), et par plusieurs installations nucléaires situées sur les rives, prélevant de l'eau pour assurer leur refroidissement.

2.1 HYDROLOGIE

Le régime hydrologique du Rhône est caractérisé par des maxima automnaux liés aux pluies méditerranéennes, et printaniers en raison de la fonte des glaces. L'hiver présente souvent des débits soutenus mais moins marqués et le régime hydraulique minimum est estival.

Le Rhône se caractérise par la diversité de son bassin versant :

- apports alpins soutenus entre mai et juillet (fonte des neiges et des glaciers) ;
- apports océaniques d'hiver, à crues lentes (Saône) ;
- apports méditerranéens et cévenols à crues violentes d'automne et étiages sévères d'été.

Il en résulte un régime hydrologique très complexe et une grande diversité dans la formation des crues et leur déroulement. Hors crues, on considère un débit moyen inférieur à 335 m³/s au barrage de Chancy-Pougny (barrage franco-suisse situé à la frontière) et à 460 m³/s au niveau du barrage de Sault-Brénaz. La valeur caractéristique d'une crue annuelle du Haut-Rhône au niveau de Chancy-Pougny est de 700 m³/s. Le débit moyen inter-annuel du fleuve à Beaucaire est de 1700 m³/s, et il est considéré en crue dès que son débit dépasse les 5000 m³/s. On distingue les types de crue suivants :

- les *crues océaniques*, dans lesquelles la Saône joue un rôle prépondérant ;
- les *crues méditerranéennes* extensives (janvier 1994), avec une forte contribution des affluents méditerranéens de rive gauche (Durance, notamment) ;
- les *crues cévenoles* (septembre 2002) avec un rôle prépondérant des affluents méditerranéens de rive droite (Ardèche, Cèze, Gardon) ;
- les crues généralisées (type 1856) ou cumulant plusieurs types (1840) qui sont les plus dommageables.

Le débit moyen inter-annuel du fleuve relevé à Beaucaire est de 1700 m³/s (données 1920-2005), avec un débit moyen mensuel variant entre 1100 m³/s et 1900 m³/s (Figure 4).

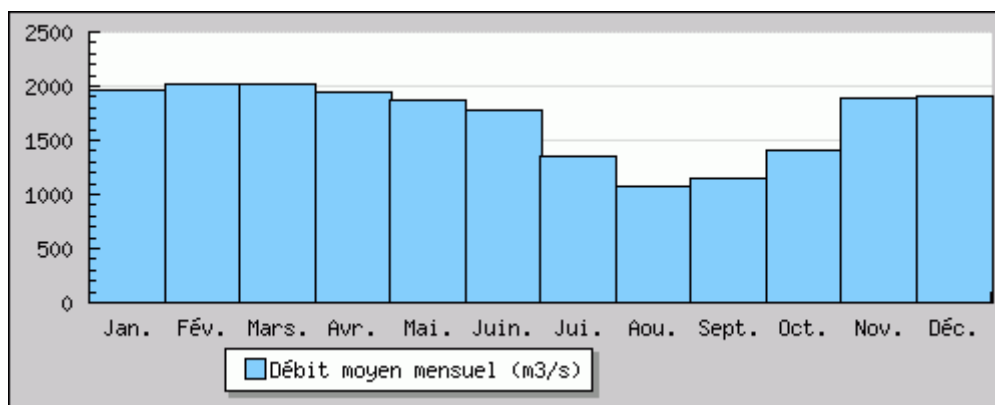


Figure 4: Le Rhône à Beaucaire, Banque Hydro

A l'amont de notre modèle à la frontière Suisse, le débit du Rhône est beaucoup plus faible avec un débit moyen mensuel variant entre 230 m³/s et 510 m³/s au barrage de Chancy-Pougny (Figure 5). Les différents affluents du Rhône tout au long de son linéaire français jouent donc un rôle hydrologique important en augmentant considérablement son débit.

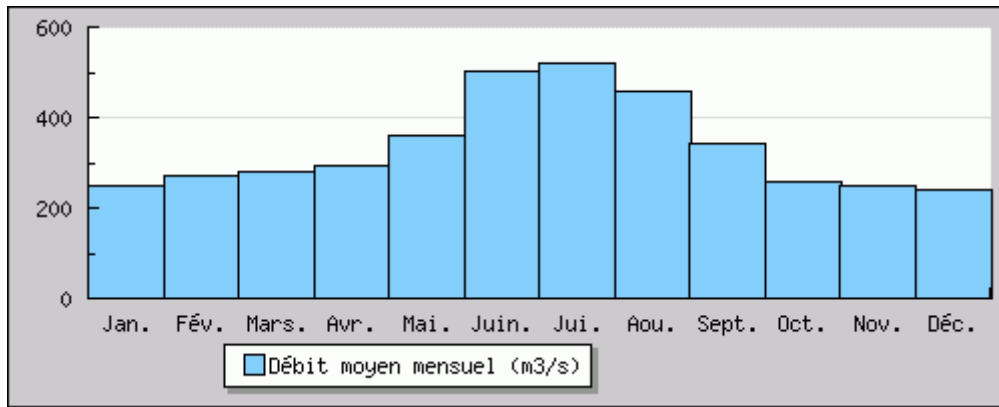


Figure 5: Le Rhône à Pougny, Banque Hydro

Sur la partie française du Rhône, les affluents majeurs (avec un débit moyen de plus de 100 m³/s) sont l'Ain, la Saône, l'Isère et la Durance. Parmi les autres affluents (avec un débit moyen de moins de 100 m³/s) notons, d'amont en aval : l'Annaz, les Ussets, la Valserine, le Fier, le canal de Savières, le Séran, le Guiers, le Furans, la Bourbre, l'Yzeron, le Garon, le Gier, la Gère, la Varèze, le Dolon, les Collières, la Cance, l'Ay, la Galaure, le Doux, la Véore, l'Eyrieux, la Drôme, l'Ouvèze, la Payre, le Roubion, l'Escoutay, la Berre, l'Ardèche, le Lez, la Cèze, l'Eygues (ou Aygues) et le Gardon (ou Gard). On peut voir sur la figure 6 l'importance hydrologique de ces affluents notamment lors des crues.

Ajoutons que deux affluents prenant leur source en France et dont la majeure partie du linéaire est français se jettent dans la Rhône en Suisse peu avant la frontière : la Dranse et l'Arve.

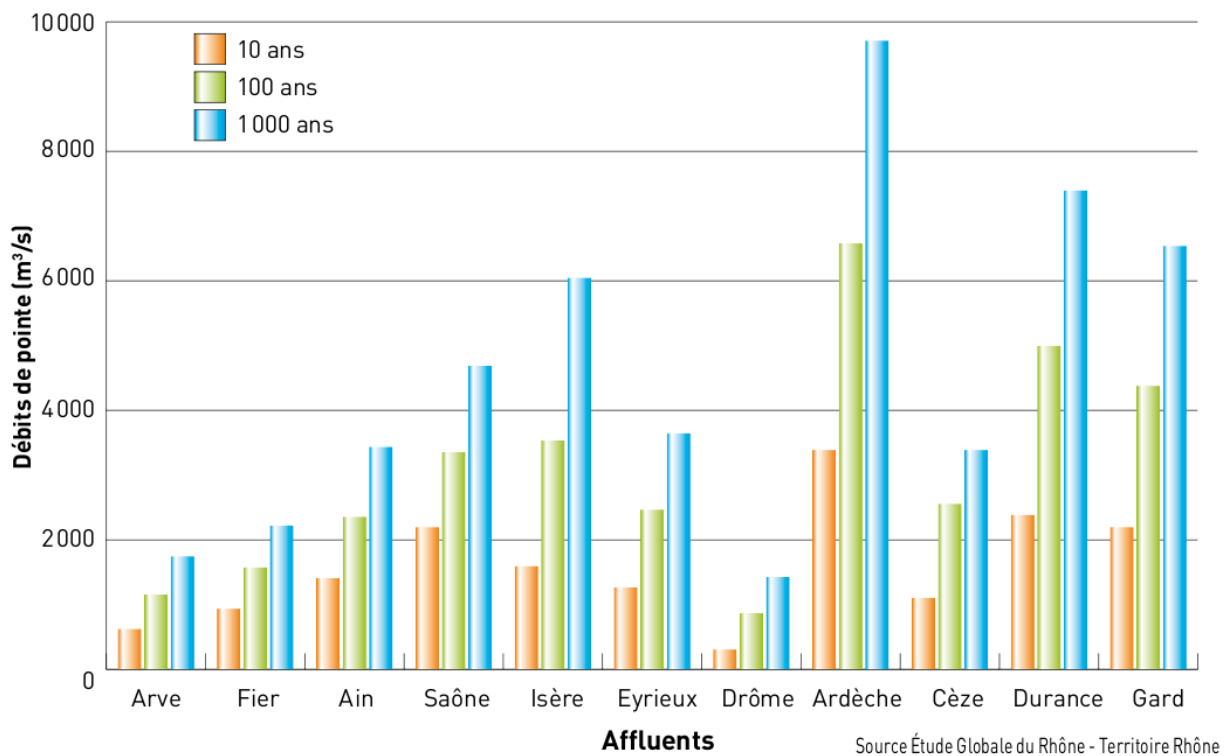


Figure 6: Débits de pointes des affluents du Rhône pour les crues de période de retour 10, 100 et 1000 ans. Étude Globale du Rhône - Territoire Rhône.

Il faut noter que l'Arve qui naît en France mais rejoint le Rhône en Suisse, est un affluent très important pour notre problématique de suivi des matériaux en suspension malgré des débits modestes. Cet affluent fait en effet partie des principaux contributeurs au Rhône en sédiments fins avec la Saône, l'Isère et la Durance. Cependant l'Arve, dont la confluence avec le Rhône se fait en Suisse, ne fait donc pas partie de notre étude qui s'étend de la frontière Suisse à la confluence entre le Rhône et l'Isère.

2.2 TRANSPORT SOLIDE ET SÉDIMENTAIRE

La dynamique fluviale naturelle du Rhône et de ses affluents, et la structure des pentes, sont fortement marquées par l'héritage des dernières glaciations (Figure 7). On retrouve la présence de lacs au niveau de zones surcreusées (Lac d'Annecy, Lac Léman, Lac du Bourget). Le transit sédimentaire couvre une large gamme de matériaux à travers deux modes : le transport par charriage sur le fond des alluvions grossières (blocs, galets, graviers, sables grossiers) et le transport en suspension des sédiments fins (sables fins, limons, argiles). Avant les grands aménagements hydroélectriques sur le cours du Rhône, les graviers et galets façonnaient le lit du fleuve et constituaient le transit sédimentaire actif. Les MES jouaient un rôle secondaire dans les marges alluviales. Aujourd'hui, seuls les sables jouent un rôle actif dans la dynamique sédimentaire du littoral. Les aménagements CNR contribuent à perturber le régime des pentes dans les retenues et des débits dans les tronçons court-circuités.

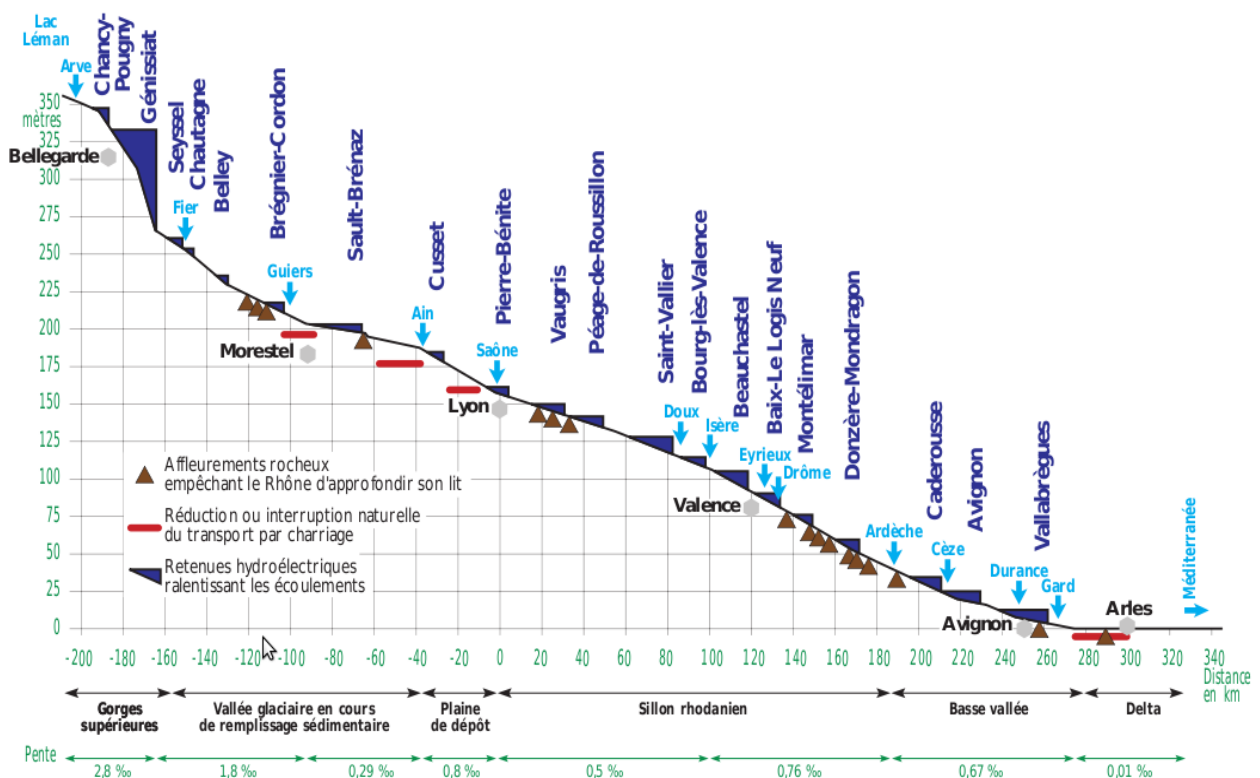


Figure 7 : Aménagements hydroélectriques sur le Rhône français, Hydratec

L'aménagement général du Rhône par la CNR a débuté en 1948 avec la mise en eau du barrage de Génissiat. La charge transportée par charriage qui arrivait jusqu'au fleuve était estimée à environ

1 Mm³/an. C'était surtout l'œuvre de l'Arve, de l'Ain, de l'Isère et de la Durance. Aujourd'hui, les apports en matériaux grossiers au Rhône ne sont plus que d'environ 0,2 Mm³/an, dont la moitié pour l'Ain et la Drôme (Figure 8). Le transport solide actuel sur le Haut-Rhône (à l'amont de Lyon) se traduit par le déplacement de près de 100 000 à 110 000 m³ de matériaux grossiers par charriage et de 1,9 à 4,5 Mt de MES. On peut retenir en général pour le Haut-Rhône un transport solide de l'ordre de 1,3 Mm³/an, sachant que pour les chasses de 2012, un apport de 1,7 Mm³ est prévu.

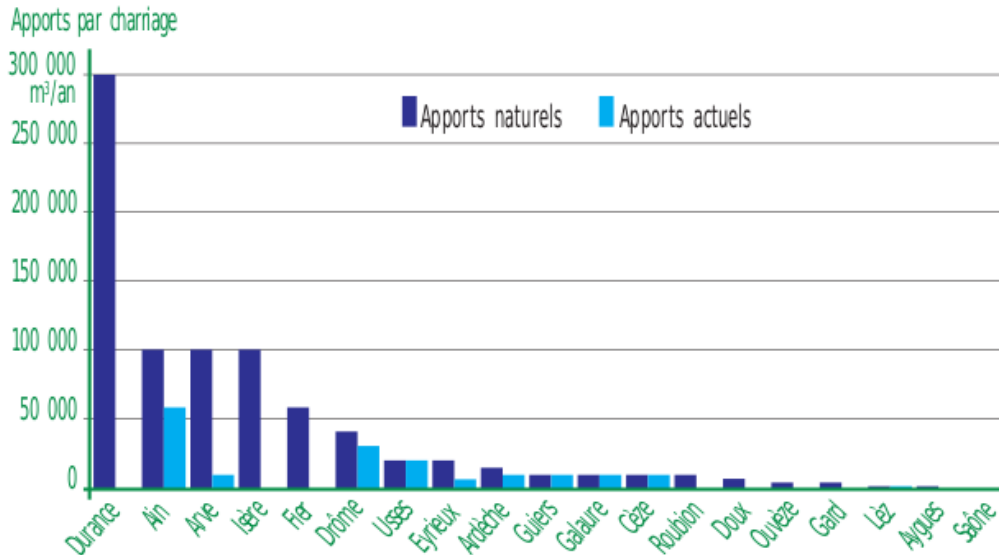


Figure 8 : Apports solides transportés par charriage jusqu'au Rhône (Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône, Institution Interdépartementale des bassins Rhône - Saône)

Les paragraphes suivants décrivent les transits sur le Rhône liés aux deux types de transport : la suspension et le charriage.

2.2.1 TRANSIT PAR SUSPENSION

Les observations et les études (Sogreah, 2001) montrent que sur le Rhône à l'état naturel, le transit en suspension est rapide. Il faut compter moins de 24h de transit en moyenne pour 100 km. En fonctionnement naturel, les dépôts dans les marges boisées (qui peuvent atteindre plusieurs décimètres au cours d'une crue) sont régulièrement repris par le fleuve par érosion. La faible mobilité actuelle du Rhône favorise un exhaussement irréversible de ces marges, ainsi qu'une réduction de la largeur du lit principal dans les retenues. Mais l'endiguement du fleuve limite la largeur sur laquelle s'appliquent ces évolutions, et donc les volumes concernés.

Le transit naturel a pu être estimé à 20 millions de tonnes par an dans les années 1950. Il est possible que le transit ait atteint 30 millions de tonnes par an au début du XXe siècle, au moment du déboisement intensif des versants.

Actuellement, les apports du bassin versant n'ont pas changé de façon significative depuis le milieu du XXe siècle : l'état des versants, le développement des zones de ravinement et le fonctionnement des torrents ont peu évolué. En revanche, les grands barrages piègent des volumes significatifs de sédiments fins : Vouglans sur l'Ain, Génissiat sur le Rhône, Serre-Ponçon sur la Durance, Tignes sur l'Isère, le Sautet et Monteynard sur le Drac, Sainte-Croix sur le Verdon, etc. La fixation du lit du

Rhône et de certains de ses affluents a favorisé également la sédimentation dans les marges alluviales. On peut estimer les apports actuels à 10 millions de tonnes par an.

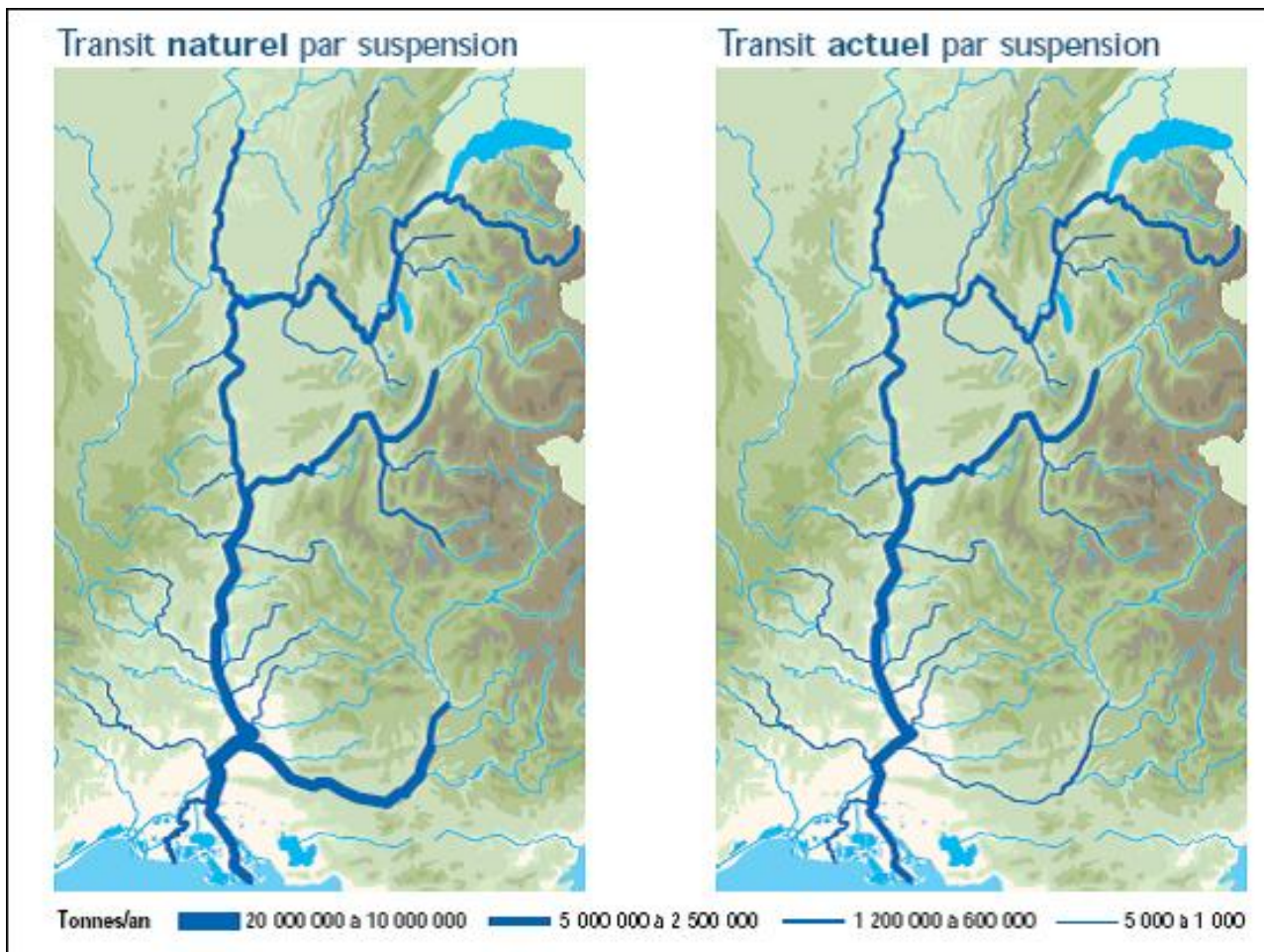


Figure 9 : Évolution du transit naturel par suspension, IRS - Sogreah 2000, mise en forme Hydratec/MINEA

2.2.2 TRANSIT PAR CHARRIAGE

Au contraire du transit par suspension, le transit par charriage est naturellement beaucoup plus lent. Le temps de transit est de plusieurs décennies pour 100 km. Avant aménagements, les profils en long n'ayant pas atteint l'équilibre depuis la dernière glaciation ne permettaient pas d'assurer la continuité du transit. Le transit était ainsi interrompu sur le Rhône en amont de Sault-Brenaz, et réduit de manière très importante à l'amont de Lyon, ainsi qu'à Chautagne. Il en était de même dans la partie aval de plusieurs affluents (Isère, Eygues, Ouvèze, etc.). D'amont en aval, on avait, avant aménagement, les ordres de grandeur suivants :

- à l'aval du lac Léman, les apports étaient assurés principalement par l'Arve (100 000 à 150 000 m³/an)
- à l'amont de Lyon, la reprise des dépôts morainiques (glaciaires) et les apports de l'Ain favorisait une pente forte avec un transit soutenu (100 000 m³/an). La majeure partie de ce transit se déposait à l'entrée de Lyon, dans le secteur de divagation de Miribel-Jonage. Le transit ne dépassait pas les 30 000 m³/an environ à l'aval de Lyon.

- sur le Bas-Rhône, le transit reprenait progressivement avec les apports des affluents, pour atteindre un maximum de l'ordre de 400 000 m³/an à l'aval de la Durance.

Depuis, le transit des graviers a été totalement bouleversé au cours du XXe siècle :

- les apports de la plupart des affluents se sont taris, en raison des aménagements dont ils ont fait l'objet : barrages, dérivations, extractions,
- sur le Rhône, des extractions importantes ont eu également lieu.

Au final, on arrive paradoxalement à un nouvel « équilibre » dû au fait qu'aujourd'hui le Rhône serait incapable de transporter les apports naturels : pentes trop faibles dans les retenues, débits trop réduits dans les tronçons court-circuités. Donc « presque pas d'apports, presque pas de transport ».

Le transit de graviers ne dépasse guère quelques milliers de m³/an sur la plupart des tronçons, avec un maximum de quelques dizaines de milliers de m³/an entre la Drôme et l'Ardèche.

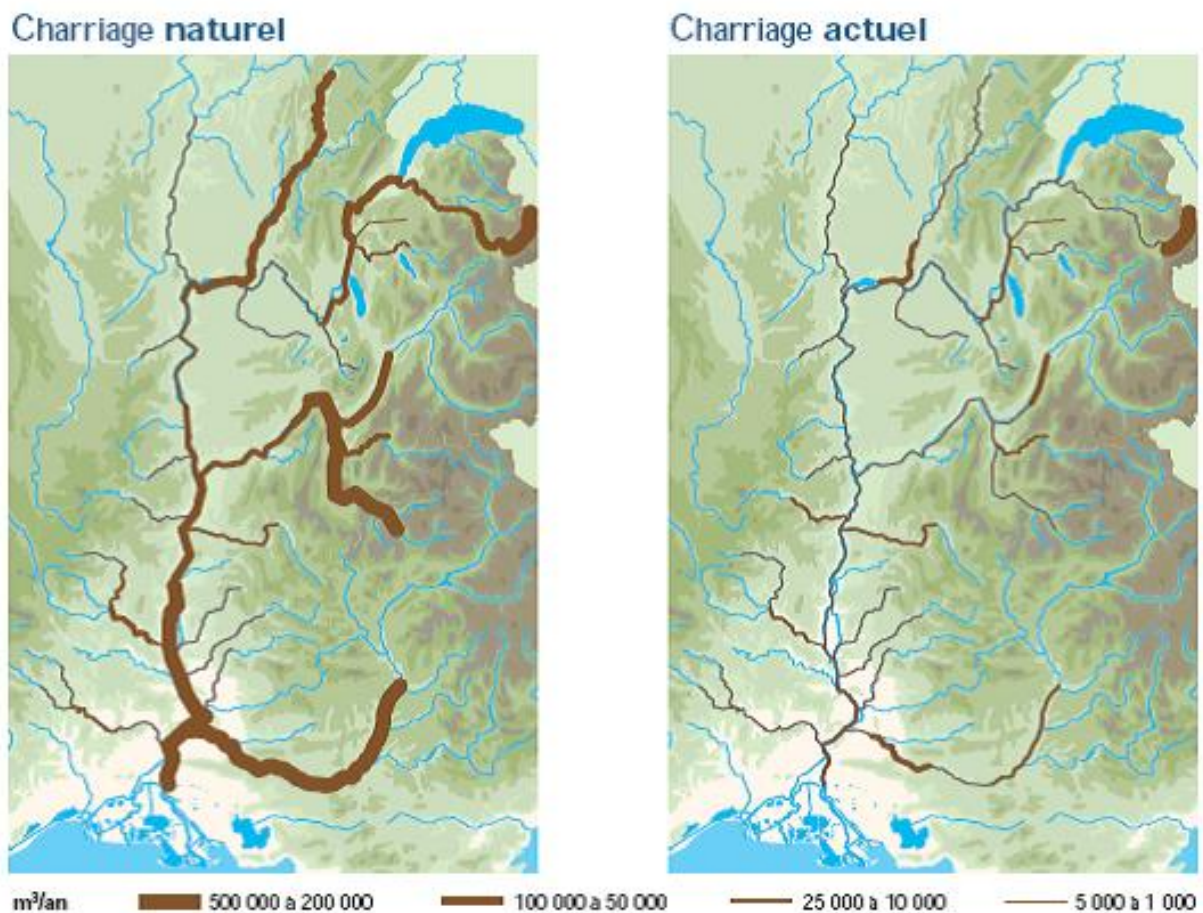


Figure 10: Evolution du charriage, IRS - Sogreah 2000, mise en forme Hydratec/MINEA - Étude globale des crues du Rhône - volet "Dynamique fluviale".

En conclusion, aujourd'hui le transport par suspension tient une place beaucoup plus importante que le transport par charriage et provoque l'envasement des retenues ainsi que de certaines marges. Se pose donc le problème des vidanges des barrages à l'aide de « chasses » qui permettent de vider les retenues des sédiments accumulés.

3 CHASSES DU RHÔNE À L'AVAL DE GENÈVE

3.1 INTRODUCTION

En Suisse, à Genève, où le barrage de Chèvres est situé aux abords de la ville, le dépôt de sédiments augmente le risque d'inondation d'une partie de la ville. On observe en effet des apports très importants en sédiments fins provenant de l'Arve dont la confluence est située sur la commune de Genève. De ce fait, des chasses régulières sont nécessaires pour éviter le comblement des retenues et conserver la capacité des réservoirs, ainsi que pour limiter le risque d'inondation des bas quartiers de Genève. Jusqu'en 2003, les chasses étaient réalisées tous les trois ans. Pour différentes raisons (stratégiques, écologiques, économiques et politiques), il n'y a pas eu de chasse depuis 2003 et une nouvelle chasse a eu lieu en juin 2012. Après 9 ans sans chasse, les enjeux et les conséquences de cette chasse se sont donc amplifiés, notamment en ce qui concerne les flux de sédiments fins et leurs impacts.

L'aménagement du Rhône Genevois, qui a débuté en 1896 avec la création du barrage de Chèvres à l'aval de Genève, a modifié le transit des matériaux entre Genève et les embouchures du fleuve sur la Mer Méditerranée. L'Arve apporte de 1 à 2 Mt (millions de tonnes) par an de matériaux minéraux fins au Rhône. Ce transport solide est considéré comme le plus gros apport de matériaux au Haut-Rhône (Figure 11).

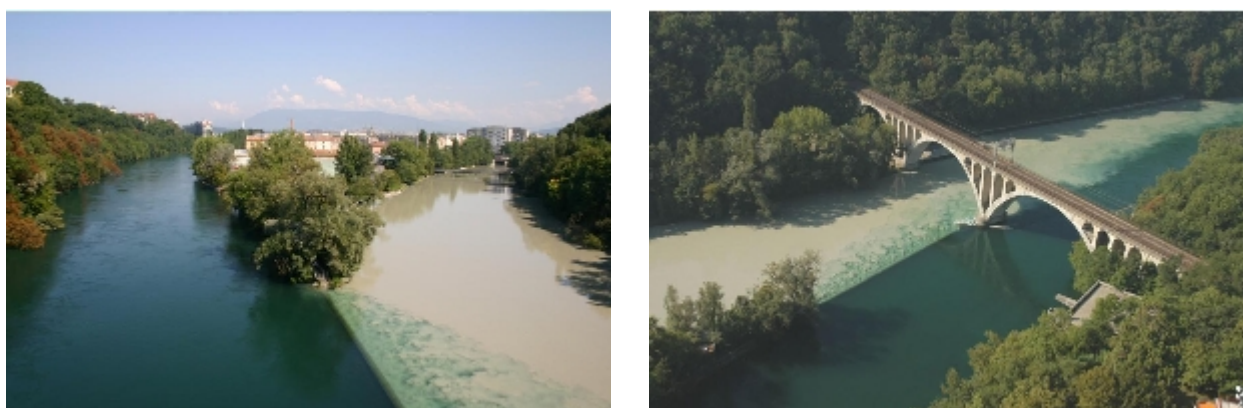


Figure 11 : Confluence du Rhône (à gauche) et de l'Arve (à droite) chargée en sédiments à Genève. Photo : SIG, crue de l'Arve, août 2005.

Cette rivière au caractère torrentiel a un fort pouvoir érosif. Ces matériaux, principalement des fines en provenance des glaciers du massif du Mont-Blanc, s'accablent en grande partie dans la retenue de Verbois. Il est indispensable d'en assurer régulièrement le transit. En effet, il faut éviter le relèvement préjudiciable des lignes d'eau en crue (inondations de la ville de Genève) et le comblement de la retenue suisse de Verbois. Les chasses sont réalisées entre la fin du printemps et le début de l'été afin qu'elles se déroulent dans des conditions optimales (CNR, 2003) :

- les débits doivent être suffisamment élevés pour assurer l'efficacité des chasses,
- les impacts sur le milieu naturel, et notamment la faune piscicole, doivent être minimisés,
- les chasses ne doivent pas empiéter sur la haute saison touristique.

Les conditions hydrauliques idéales pour assurer l'évacuation des MES des retenues de Verbois et Chancy-Pougny et le transit de ces matériaux au travers des retenues françaises situées en aval sont :

- Un débit minimal de 500 à 600 m³/s à l'aval de l'Arve pendant une période de plusieurs jours pour assurer les chasses des retenues suisses ;
- Un niveau du Lac Léman suffisant pour moduler convenablement le débit, notamment pour le remplissage des retenues en fin d'opération.

Il est également nécessaire d'assurer l'alimentation en eau de la centrale nucléaire EDF du Bugey par un débit minimal de 140 m³/s pour son refroidissement.

3.2 *HISTORIQUE DES CHASSES*

Les premières opérations de chasses des sédiments furent mises en place dès 1913 sur le barrage de Chèvres, en aval immédiat de la ville de Genève (CNR, 2010).

En 1944, la retenue de Verbois est mise en eau. Durant cette période, la direction des opérations se tient en Suisse. Le barrage de Génissiat est mis en eau après la seconde guerre mondiale, en 1948. L'objectif pour les exploitants français est alors d'éviter le stockage massif de sédiments dans les retenues. Les meilleures conditions de transit sont mises en œuvre pour éviter des dommages à l'environnement, en tenant compte des besoins des différents usagers du Rhône et des prescriptions contenues dans les cahiers des charges spéciaux des chutes. Cependant, au cours des 9 chasses suivant la mise en service de Génissiat, de fortes pollutions du fleuve sont observées (CNR, 2010). Celles-ci seraient dues aux rejets des égouts de la ville de Genève directement dans le fleuve. En 1968, plusieurs stations d'épuration des eaux usées (STEP) sont installées près du Rhône. Des accords franco-suisses concernant les modalités de chasses et notamment le respect d'une périodicité de trois années, sont établies en 1967.

Lors des chasses de 1972 et 1975, une nette amélioration des taux d'oxygène dissous et des taux de NH₄ a été constatée. La pollution des eaux en aval de Lyon fut quasiment éliminée. La chasse de 1978 a été marquée par la vidange quasi-complète de la retenue de Génissiat à l'occasion de la première visite décennale du barrage de Génissiat. Malheureusement, une brutale rétention de débit à Chancy-Pougny a provoqué un abaissement exagéré du niveau de Génissiat. Consécutivement à l'abaissement brutal du niveau de la retenue et aux fortes vitesses d'écoulement qui en ont résulté, des effondrements massifs de murs de vase dans la retenue ont provoqué des pollutions minérales et organiques importantes avec des pointes de 110 g/l de MES et une valeur nulle de l'oxygène dissous à Seyssel pendant plusieurs heures. Les répercussions de cette opération ont été désastreuses pour l'ensemble du fleuve, avec des mortalités piscicoles particulièrement intenses et perceptibles jusqu'à Lyon.

Avec le bilan déplorable de la précédente chasse, des dispositions strictes ont commencé à voir le jour lors de la chasse de 1981. Bien que les contraintes concernant les concentrations de MES aient été respectées, une majorité des sédiments évacués de Verbois continuent de combler la retenue de Génissiat. Des études poussées ont été réalisées afin de fixer des critères stricts pour la chasse de 1984, de manière à éviter des dépôts trop importants dans les retenues en aval de Verbois, tout en limitant les concentrations en MES pour préserver la faune et la flore aquatique. Cette chasse fut plus longue afin d'assurer une meilleure dilution et un meilleur contrôle des MES.

La chasse de 1987 a été marquée par de forts débits naturels. Commencée dans des conditions difficiles, cette chasse a dû, conformément aux consignes, être interrompue par suite des conditions hydrologiques qui ont rendu impossible le transit des sédiments par la vanne de fond de Génissiat. Aucun impact majeur sur l'environnement n'a été signalé. Lors de la chasse de 1990, l'envasement

de l'amont du barrage de Génissiat était tel que les eaux évacuées par la vanne de demi-fond étaient très chargées et ne permettaient plus d'opérer la dilution dans le flux aval.

Un dragage préalable a permis que la chasse de 1993 soit globalement satisfaisante, malgré un taux de rendement faible : sur 1 350 00 tonnes de matériaux entrés dans la retenue de Génissiat, seuls 700 000 tonnes en sont ressorties, soit environ 52 %.

En 1997, le niveau du Lac Léman est inférieur à l'objectif visé et le débit prévu de 600 m³/s n'a pu être atteint (CNR, 1997). De plus, des pêches de sauvetage préventives ont été réalisées sur le Vieux- Rhône de Chautagne mais aucune mortalité massive de poissons n'a été constatée. Lors de cette chasse, l'abaissement de la retenue de Génissiat a été effectué précédemment à ceux des retenues suisses amont.

La chasse de 2000 a nécessité un dragage préalable de l'entonnement de la vanne de demi-fond du barrage de Génissiat (CNR, 2000). Cette opération a permis une bonne dilution des MES par le jeu des vannes de demi-fond et de fond.

Enfin les dernières opérations se sont tenues en mai 2003. Cette chasse s'est bien déroulée malgré une situation hydrologique déficitaire et un petit épisode de crue sur l'Arve et le Fier. Vingt chasses on ainsi été effectuées depuis 1942 et jusqu'en mai 2003.

Pour des raisons administratives, la chasse de 2006 a été annulée. La chasse de 2009 a été repoussée en 2010 puis 2012. La Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), service instructeur pour l'accompagnement des chasses suisses sur les ouvrages français, a posé le cadre réglementaire. La consigne générale des mesures d'accompagnement des chasses suisses est mise en œuvre par la CNR sous le contrôle de la DREAL Rhône-Alpes.

3.3 *CADRE ADMINISTRATIF DE LA CHASSE DE MAI 2012*

La Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE), adoptée le 23 octobre 2000, permet à l'Union Européenne d'organiser la gestion des eaux intérieures de surface, souterraines, de transition et côtières (CNR, 2010). Ceci en vue essentiellement de prévenir et de réduire leur pollution. Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du bassin Rhône-Méditerranée (SDAGE), mis à jour en 2009, répond aux ambitions de la DCE en constituant un outil de mise en œuvre. Le SDAGE fixe les objectifs pour chaque masse d'eau du bassin (plans d'eau, tronçons de cours d'eau, estuaires, eaux côtières, eaux souterraines). Plusieurs masses d'eau, superficielles et souterraines, sont définies dans la DCE pour le Haut-Rhône, de la frontière franco-suisse à la confluence avec la Saône. L'atteinte de « bon état » en 2015 est un des objectifs généraux. L'état écologique et chimique de ces masses d'eau est estimé, notamment à travers : les concentrations en métaux, HAP et PCB, les taux d'oxygène dissous et d'ammonium, l'eutrophisation, la bactériologie et les MES. Les MES constituent le principal paramètre déclassant sur l'ensemble des stations de la zone d'étude. Une attention particulière leurs est portée, car il s'agit du plus potentiellement impactant lors des prochaines opérations de chasse. La mesure de la concentration en MES est réalisée tout au long des chasses du Rhône afin de respecter les contraintes d'environnement et de sécurité imposées au niveau du barrage de Seyssel :

- 5 g/l en moyenne,
- 10 g/l pendant 6 heures maximum,
- 15 g/l maximum absolu, pendant 30 minutes.

Le calendrier des opérations d'accompagnement de la chasse suisse de juin 2012 a été établi. Les manœuvres se sont déroulées les semaines 23 et 24 (du 4 au 18 juin). Un repli possible avait été

prévu, en cas de conditions hydrologiques défavorables, avec un décalage d'une semaine (semaines 24 et 25, du 11 au 25 juin). Se décalage n'a pas eu lieu. Les manœuvres ont débutées sur les retenues françaises avec Génissiat, suivies de l'ensemble des autres aménagements CNR en aval. Ces opérations nécessitent une collaboration étroite entre les SIG et la CNR pour l'élaboration du programme des opérations et des documents de communication. Les opérations d'accompagnement des chasses suisses se déroulent en deux phases : (Figure 12)

1. D'abord, les plans d'eau des différentes retenues sont abaissés, ce qui contribue au transit des sédiments. Au cours de cette première phase, la retenue de Génissiat est abaissée en premier afin d'être vidangée avant l'arrivée des matériaux issus des retenues suisses amont, puis les retenues suisses de Verbois et Chancy-Pougny sont abaissées à leur tour.
2. Puis, les retenues sont remontées à leur cote d'exploitation normale, ce qui contribue à une décantation des MES dans les retenues où elles sont piégées (Figure 4) (CNR, 2010). Lors de cette deuxième phase, on remarque la remontée préalable et par palier de la retenue de Génissiat. Ce processus permet le transit des matériaux suisses vers l'aval.

L'ensemble des manœuvres d'abaissement des plans d'eau gérés par la CNR vise à faire transiter, vers l'aval, un volume équivalent au volume de MES ayant franchi la frontière franco-suisse (CNR, 2010). Lors de ces opérations, les écluses de navigation de plaisance de Chautagne, Savières et Belley sont fermées et interdites à la navigation pendant toute la durée de l'opération. À la cote 320 m NGF, les groupes hydroélectriques de Génissiat sont arrêtés. L'essentiel de l'évacuation du débit se fait par la vanne de fond. L'ouverture de cette vanne engagera le démarrage du transit de MES. Un réglage des débits transitant par les vannes de fond et demi-fond permet de doser le flux de MES envoyé à l'aval. Il est ainsi possible de contrôler les taux prévisibles au pont de Seyssel où se trouve la station de référence.

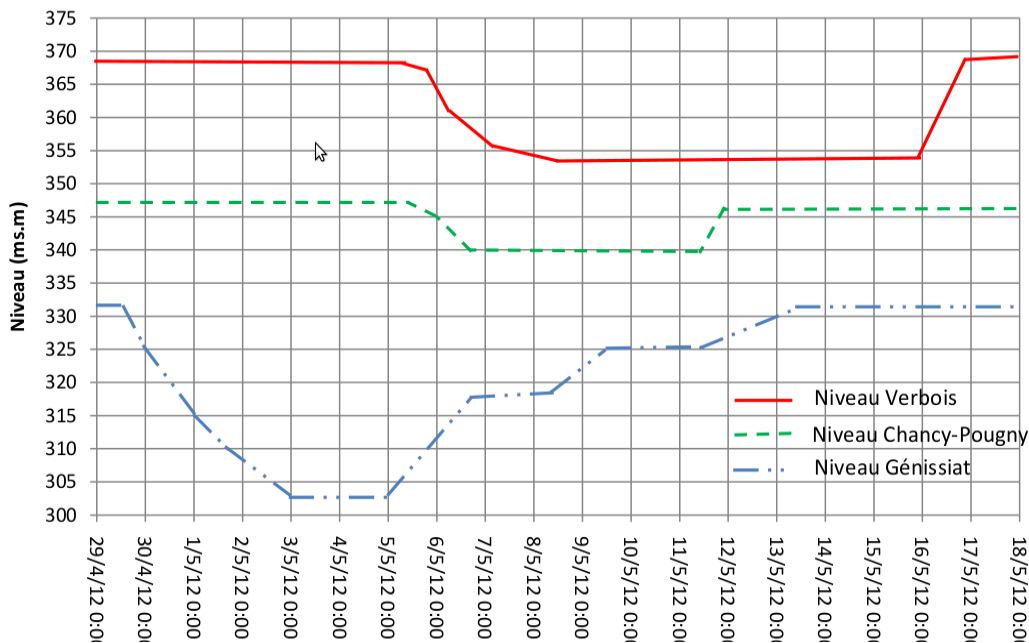


Figure 12: Abaissement des plans d'eau de Verbois, Chancy-Pougny et Génissiat.

4 MODE DE GESTION DES OUVRAGES DU RHÔNE

4.1 OBJECTIFS

La gestion de la ressource et des écoulements du Rhône et de ses affluents, aussi bien en crue qu'en basses eaux, suppose de nombreuses contraintes. Le mode de gestion des ouvrages du Rhône doit concilier trois objectifs :

- production hydroélectrique,
- navigation,
- et irrigation.

Le choix technique retenu pour réaliser ces trois objectifs a été de mettre en place des aménagements au fil de l'eau avec une capacité d'accumulation limitée.

Chaque chute doit réagir aux perturbations des chutes amont, tout en se préoccupant de ses propres effets sur les chutes aval et en respectant les règles fixées par sa consigne d'exploitation. Ces règles sont définies de façon à satisfaire les objectifs et contraintes aussi bien en période normale qu'en crue.

4.2 PRINCIPE DE GESTION DES PLANS D'EAU

Le mode de gestion est basé sur la régulation des niveaux des plans d'eau en fonction des débits entrants dans chacun des aménagements. Pour chaque aménagement, une consigne d'exploitation normale et en crue permet de respecter :

- les niveaux d'eau dans les retenues,
- la répartition de débits entre usines et barrages.

Cette consigne d'exploitation (exemple Figure 13) est établie par le concessionnaire et est soumise à l'approbation des services de contrôle (DRIRE et SNRS). La consigne d'exploitation définit pour chaque aménagement des lois hauteur/débit $Q(H)$ à respecter en des points de la retenue précis, appelés « points de réglage ». La détermination de ces points et des lois $Q(H)$ associées font l'objet d'études hydrauliques tenant compte des caractéristiques de la retenue ainsi que des conditions d'écoulement.

Chaque retenue possède un ou deux points de réglage. La régulation du plan d'eau est assurée par l'usine tant que le débit du Rhône est inférieur à son débit d'équipement. Au-delà, c'est le barrage qui s'ouvre progressivement et qui assure la continuité de la régulation.

AMENAGEMENT DE PIERRE BENITE
CONSIGNE D'EXPLOITATION NORMALE ET EN CRUE
COURBES HAUTEUR/DEBIT

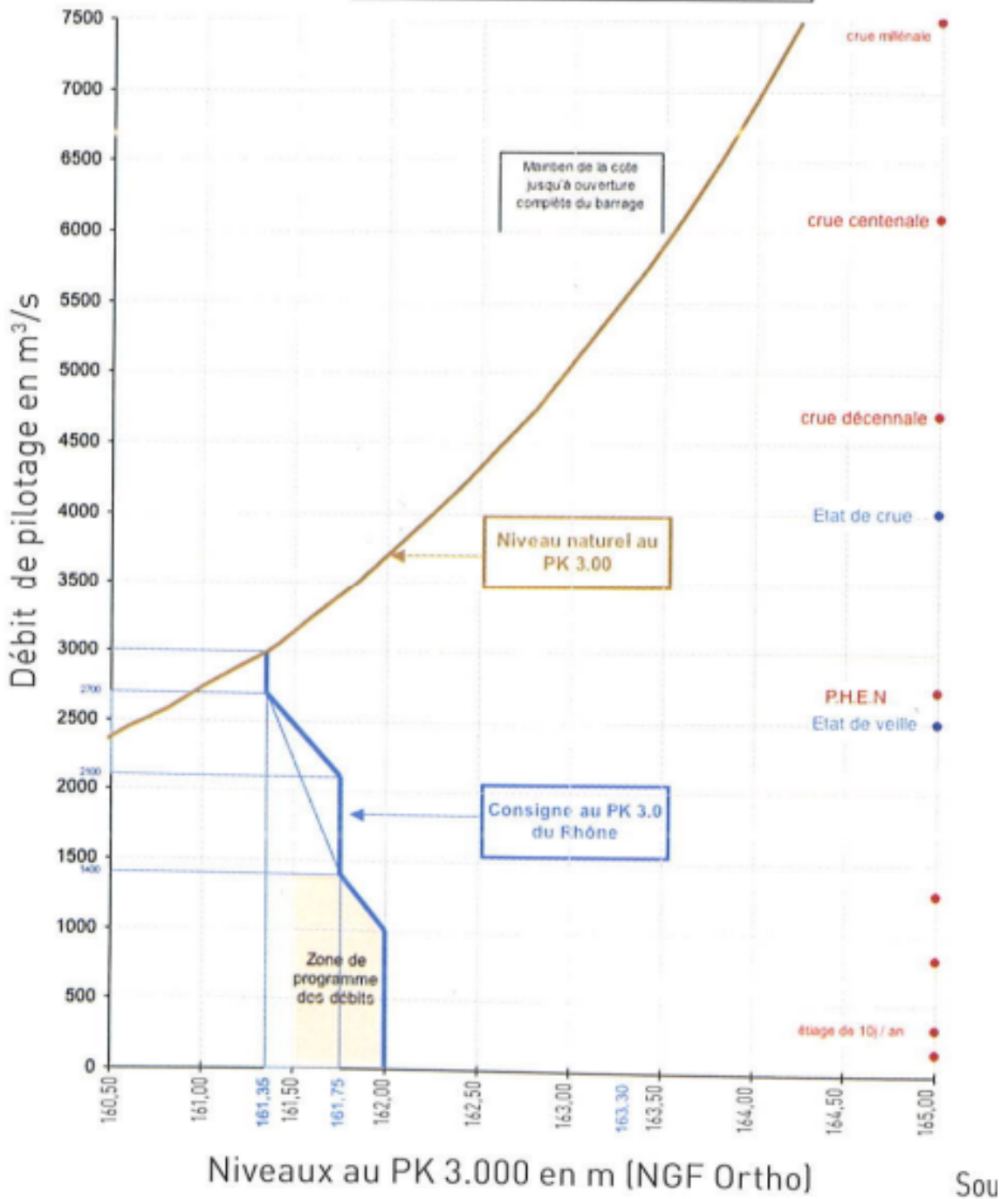


Figure 13 : Aménagement de Pierre-Bénite, exemple de consigne d'exploitation à un point de réglage. Courbe hauteur/débit, CNR.

Pour les forts débits, il en résulte un effet de basculement normal du plan d'eau. À l'amont du barrage le niveau s'abaisse et l'on pourrait croire à une vidange de la retenue alors que s'amorce la crue. En réalité il n'en est rien, le niveau à l'amont du point de réglage monte progressivement dans le respect de deux principes fondamentaux, à savoir :

- la croissance progressive du volume de la retenue en fonction du débit
- et la non-aggravation des niveaux observés avant aménagement dans les zones non protégées contre les inondations (Figure 14).

De même, le basculement du plan d'eau conduit à l'abaissement du niveau à l'amont de l'usine et à l'exhaussement de son niveau aval. La chute disparaît progressivement et la production électrique devient marginale. Cependant, sauf exception, l'usine reste en fonctionnement, non plus dans un objectif de production hydroélectrique, mais seulement pour soulager le Vieux-Rhône d'une partie du débit. Pour certaines usines (principalement sur le Haut Rhône), le débit est réduit voire annulé, pour permettre aux principales zones d'expansion des crues de conserver leur rôle d'écrêtement (marais de Lavours et de la Chautagne, plaine de Pierrelatte, ...).

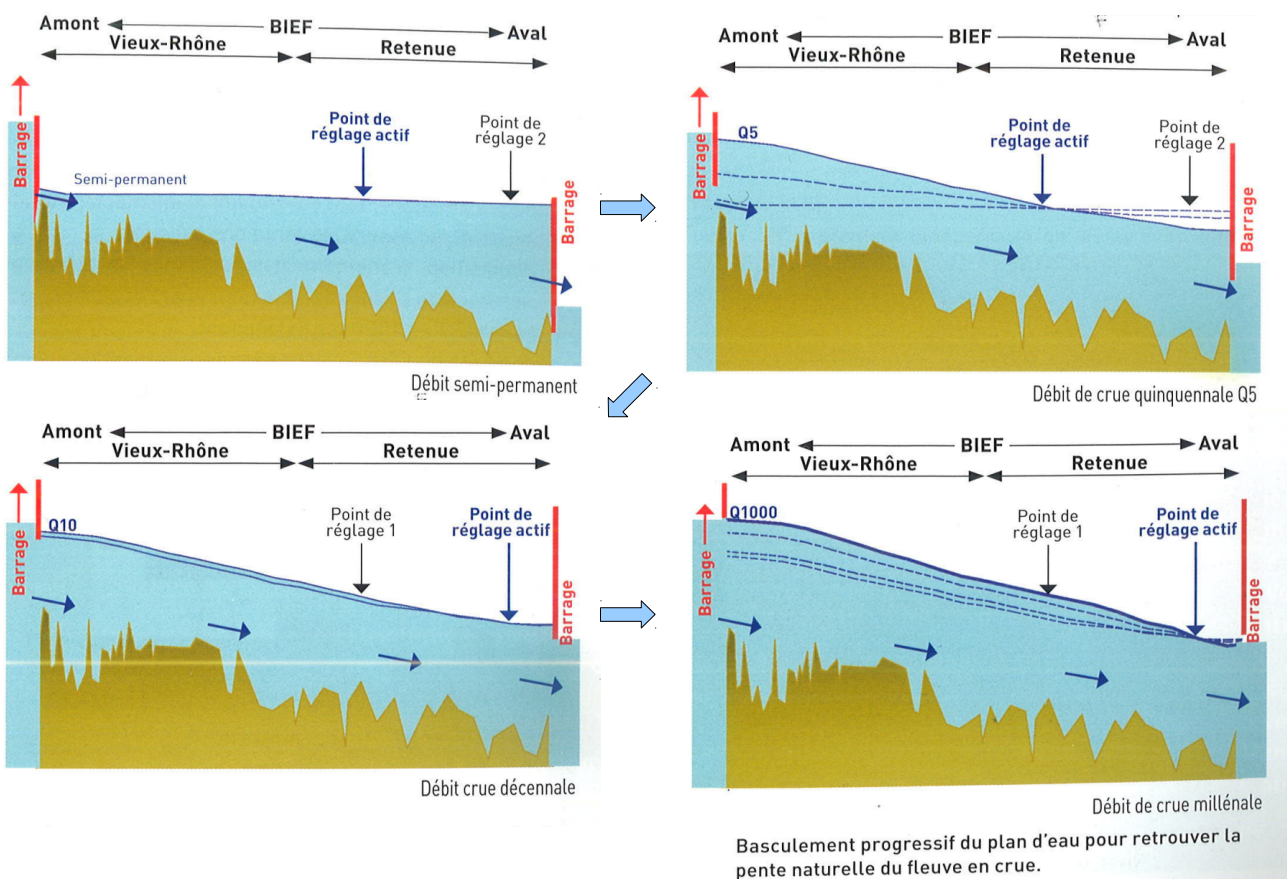


Figure 14: Basculement du plan d'eau lors d'une crue, ZABR.

5 LA MODÉLISATION HYDRO-SÉDIMENTAIRE DU RHÔNE

Le but de notre étude dans le cadre de ce projet étant de mettre au point un outil numérique pour analyser le transport de sédiments sur le Rhône de la frontière franco-suisse à la confluence avec l'Isère, nous avons réalisé une modélisation hydraulique et sédimentaire multi-biefs du Rhône. Notre projet se décompose en trois études comprenant le modèle global du Rhône ainsi que deux sous-modèles sur nos sites d'études pilotes :

- le modèle global du Rhône français jusqu'à l'Isère,
- le site pilote de Miribel-Jonage,
- le site pilote de la lône du Beurre.

Les « sous-modèles » effectués sur les zones de Miribel-Jonage et de la lône du Beurre ont par la suite été ré-intégrés au modèle global pour le compléter. De ces trois études découlent trois modélisations hydrauliques et sédimentaires. Chacune de ces études fait également l'objet d'un rapport détaillé dont on trouvera ci-dessous les grandes lignes (cf. paragraphes 5.3, 5.4, 5.5). Par la suite, le modèle globale du Rhône français pourra être aisément mis à jour et complété par des données complémentaires en détaillant des zones particulières (affluents, confluences, lônes, casiers, etc.).

La modélisation se fait en utilisant un logiciel de simulation hydraulique mono-dimensionnelle d'écoulement en rivière (Code de calcul Mage, Cemagref 2009) couplé à un modèle d'advection-dispersion pour simuler le transport de sédiments (Code de calcul Adis-TS, Irstea 2012). Ces modèles présentent l'avantage d'une résolution rapide ce qui permet de simuler des événements de longues durées (plusieurs années et dizaines d'années) sur un long bief (plusieurs centaines de kilomètres, dans notre cas 300 km).

5.1 MODÈLE HYDRAULIQUE 1D : MAGE

MAGE est un logiciel de simulation mono-dimensionnelle d'écoulement en rivière en régime transitoire. Son domaine d'application privilégié est la simulation des crues et des zones inondées. Les équations utilisées sont les équations de Barré de Saint-Venant unidimensionnelles avec la formule de perte de charge de Manning-Strickler qui s'expriment comme suit :

$$\text{conservation de la masse} \quad \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_{lat} \quad (1)$$

$$\text{équation dynamique} \quad \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial z}{\partial x} = -gS(J + J_s) + kq_{lat} V \quad (2)$$

Avec : t le temps, x l'abscisse en long, S la section mouillée, Q le débit, Z la cote de la surface libre, V la vitesse moyenne ($V = Q/S$), β le coefficient de quantité de mouvement (Boussinesq), g la gravité, J les pertes de charge linéaires par frottement, J_s pertes de charge singulières (élargissement ou rétrécissement brusques), q les pertes ou apports latéraux par unité de longueur (en m^2/s : ruissellement, pluie, déversements, échanges avec le lit majeur) et k un coefficient dépendant du signe de q_{lat} ($k = 1$ si $q_{lat} < 0$, $k = 0$ si $q_{lat} \geq 0$).

MAGE prend en compte la géométrie réelle du lit de la rivière définie par des profils en travers et utilise une modélisation géométrique de la rivière en lit composé – mineur, moyen (majeur actif) et majeur de stockage – avec calcul de la répartition des débits en utilisant les équations Debord (Nicollet & Uan, 1979) avec différentes valeurs du coefficient de Strickler possibles $K_{m/M}$ pour le

chenal (lit mineur) et le lit moyen, respectivement (Figure 15). Il est également possible de définir des casiers de stockage pour modéliser des plaines d'inondations où la vitesse de l'écoulement est supposée négligeable, ce qui permet la modélisation des échanges entre zones d'écoulement et zones de stockage. La topologie du réseau peut être maillée ce qui permet de représenter des confluences, des diffluences (îles) et des conditions aval multiples (deltas). La discrétisation des équations de Barré de Saint-Venant est faite selon un schéma aux différences finies semi-implicite à quatre points (schéma de Preissmann).

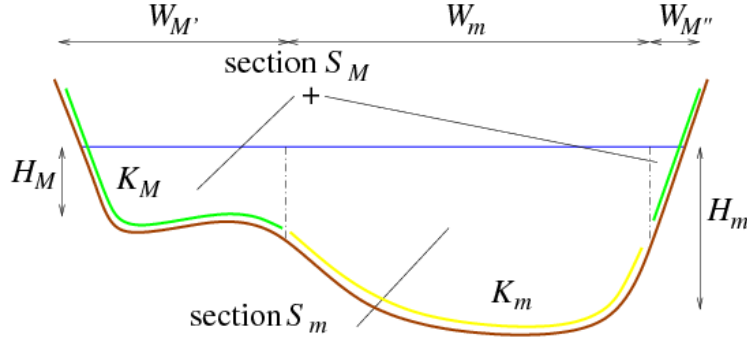


Figure 15: Représentation schématique d'une rivière à lits composés. Les indices m et M correspondent respectivement au lit mineur et lit majeur.

5.2 MODÈLE 1D D'ADVECTION-DIFFUSION : ADIS-TS

5.2.1 DESCRIPTION GÉNÉRALE DU MODÈLE

ADIS-TS résout l'équation classique d'advection-dispersion :

$$\frac{\partial(SC)}{\partial t} + \frac{\partial(CQ)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(S D_f \frac{\partial C}{\partial x} \right) + (P - D)W + q_{lat} C_{lat} \quad (3)$$

avec D_f le coefficient de dispersion longitudinal, P le taux de reprise, D le taux de déposition, W la largeur de la rivière en eau, et C_{lat} la concentration de sédiments fins si $q_{lat} > 0$. L'équation de conservation de la masse permet de calculer la masse $M_{fs} = \rho_s(1 - p)S_{fs}L$ de sédiments fins disponible dans la section et sa distribution à travers la section ($\rho_s \approx 2650$ g/l est la masse volumique des sédiments, S_{fs} est la section en travers du dépôt de sédiment, p la porosité du dépôt et L la longueur de la section). Ce dépôt est hypothétique étant donné que le modèle ne prend pas en compte l'évolution du fond du lit.

La description ci-dessus est faite pour une classe de dépôt avec des caractéristiques fixes (la taille de grain, la vitesse, ...). Le modèle peut prendre en compte un mélange de plusieurs classes.

5.2.2 CALCUL DES TERMES SOURCES POUR UN LIT COMPOSÉ

En première approximation, on suppose le dépôt uniforme sur le lit majeur et le lit mineur. Les taux de dépôt et d'érosion de l'équation 3 peuvent être estimés ensemble comme suit (voir aussi Figure 15) :

$$(P - D)W = a_{PD} e_{disp,m} (C_{eq,m} - C) \frac{W_s}{H_m} W_m + a_{PD} e_{disp,M} (C_{eq,M} - C) \frac{W_s}{H_M} W_M \quad (4)$$

où a_{PD} est un coefficient de calage, $e_{disp,m/M}$ un coefficient indiquant la disponibilité de dépôt dans le canal ($e_{disp,m/M} = 0$ si il y a érosion et si $M_{fs,m/M} = 0$; $e_{disp,m/M} = 1$ sinon), $C_{eq,m/M}$ la concentration d'équilibre, W_s la vitesse de chute du sédiment, $H_{m/M}$ la profondeur moyenne dans le lit mineur / lit majeur et $W_{m/M}$ est la largeur mouillée du lit mineur / lit majeur. On considère ici la concentration C homogène dans toute la section. Finalement, il y a érosion si la concentration d'équilibre C_{eq} est supérieur à la moyenne de la concentration C calculée grâce au modèle ; il y a dépôt si $C_{eq} < C$.

La concentration d'équilibre dans les lits mineurs et majeurs $C_{eq,m/M}$ peut être estimée en fonction de la contrainte de cisaillement $\tau_{m/M}$ calculée par le modèle, comme suit :

$$C_{eq,m/M} = a_c \left(\frac{\tau_{m/M}}{\tau_{cr}} - 1 \right)^{b_c} \quad (5)$$

où a_c et b_c sont des paramètres de calage ($b_c = 1$ comme première approximation, cf. Camenen, 2011).

Voici les caractéristiques des trois coefficients à fixer dans le cadre de la modélisation :

- $a_{pd} = 0,1$: coefficient de la loi de dépôt-érosion,
- $a_c = 0,001$: coefficient de la loi pour la concentration à l'équilibre ; homogène à une concentration,
- $b_c = 1$: exposant de la loi pour la concentration à l'équilibre.

Les valeurs données ici sont issues d'un premier calage réalisé sur une chasse des barrages de l'Arc en Maurienne. Une validation plus rigoureuse serait nécessaire mais nécessite un jeu de données (topographie et sédimentaire) très détaillé en temps et espace. Des améliorations sont donc toujours possibles même si les premiers résultats obtenus restent tout à fait cohérents.

5.2.3 CALCUL DU COEFFICIENT DE DISPERSION

Il est possible d'utiliser quatre méthodes différentes d'évaluation des coefficients de dispersion dans Adis-TS. On peut utiliser différentes méthodes pour chacune des parties du modèle au cours d'une même simulation. Chaque méthode utilise un coefficient de proportionnalité qui sert de coefficient de calage. Les trois premières méthodes proposées consistent en une application de formules semi-empiriques : Elder (1959), Fisher (1967) et Iwasa & Aya (1991). Chacune de ces formules peut s'écrire de la forme suivante (Camenen, 2011) :

$$\frac{D_f}{H_{m/M} U_{*m/M}} = a \left(\frac{U_{m/M}}{U_{*m/M}} \right)^b \left(\frac{W_{m/M}}{H_{m/M}} \right)^c \quad (6)$$

où a , b et c sont des paramètres de calage variant selon les auteurs, $U_{m/M}$ la vitesse moyenne dans le lit mineur / lit majeur, $U_{*m/M}$ la vitesse de frottement dans le lit mineur / lit majeur ($U_{*m/M} = \sqrt{\tau_{m/M} / \rho}$).

Tableau 1: Coefficients a , b et c pour les formules du coefficients de dispersion.

Formules	Coefficient a	Coefficient b	Coefficient c
Elder (1959)	100	0	0
Fisher (1967)	0,011	2,0	2,0
Iwasa & Aya (1991)	2	0	1,5

La quatrième méthode utilise un coefficient de dispersion constant. Dans ce cas, le coefficient de dispersion est la valeur fournie par l'utilisateur, il ne dépend d'aucune variable provenant des conditions d'écoulement. Le coefficient de dispersion final est toujours la somme du coefficient de diffusion moléculaire (fixé à 10^{-6} m²/s) et du coefficient fourni par la formule de calcul choisie.

5.3 SITE PILOTE DE MIRIBEL-JONAGE

La problématique principale liée au site de Miribel-Jonage est l'impact des chasses sur la zone et le potentiel colmatage du fond du lit. La conséquence d'un colmatage et la diminution de l'infiltration d'eau et donc la diminution de la recharge de la nappe phréatique.

Cette étude a été réalisée en partenariat avec le Grand Lyon et Véolia qui exploite la zone de captage d'eau potable.

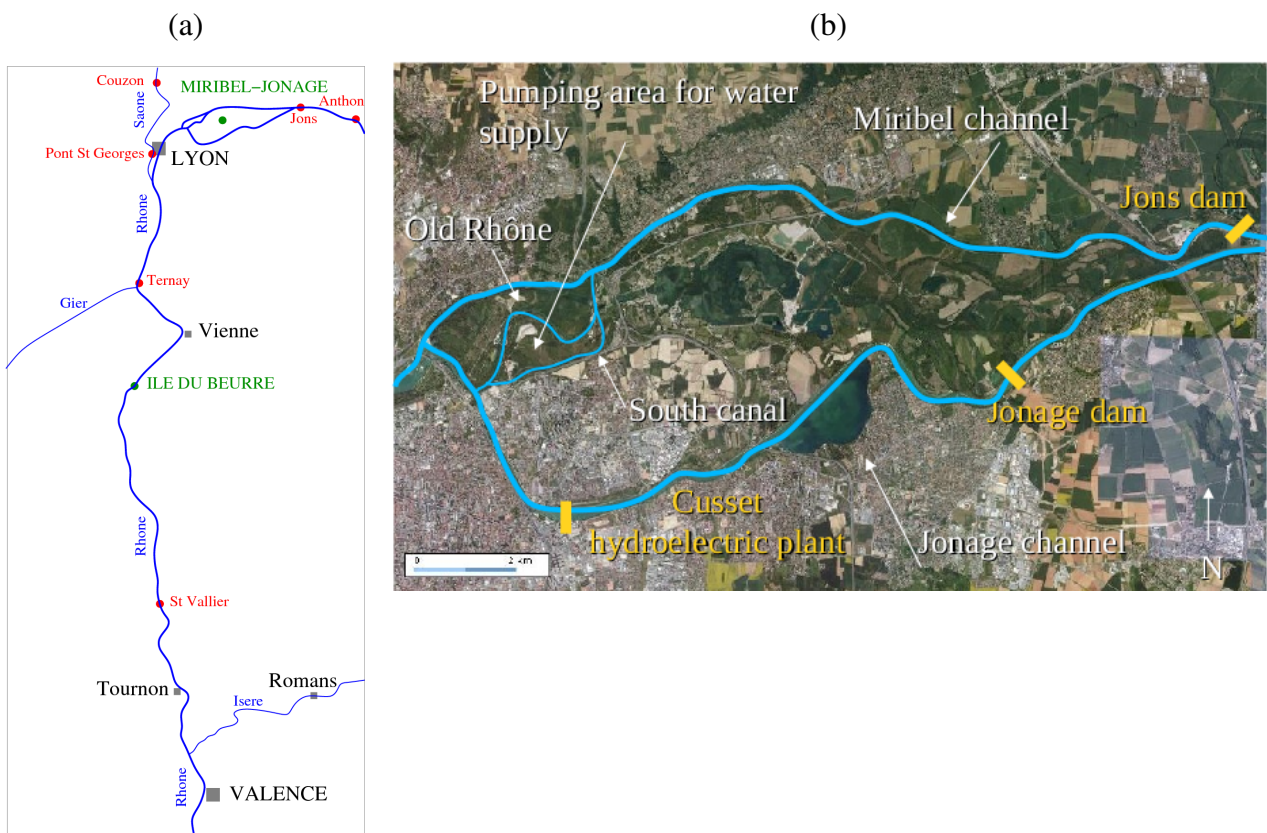


Figure 16 : Localisation (a) et description du site pilote de Miribel-Jonage (Geoportail)

Le système de Miribel-Jonage est une ancienne zone de divagation du Rhône. Elle se situe dans une zone de faible pente qui a été chenalisée en un système complexe de plusieurs bras (Figure 16). Dans cette zone sont localisés plusieurs ouvrages hydrauliques sur différents bras, ainsi que des captages d'eau potable assurant 80 % de l'alimentation en eau potable de la ville de Lyon.

Nous nous sommes préoccupés du risque de dépôt de sédiment dans le Vieux-Rhône (situé au cœur des captages d'eau potable), lors d'une chasse du Rhône. En utilisant le modèle numérique 1D Mage de Irstea, l'objectif a été de définir la meilleure gestion possible des ouvrages hydrauliques

pour minimiser le dépôt de sédiments sur la zone de captage. Deux principales options sont proposées :

- minimiser l'entrée de matières en suspension (MES) en diminuant le débit entrant dans le Vieux-Rhône le temps de la chasse,
- minimiser le dépôt de sédiments dans le Vieux-Rhône en augmentant la vitesse.

Chacun de ces scénarios requiert une gestion spécifique des ouvrages hydrauliques et la modification ou construction de nouveaux ouvrages peut être envisagée (voir Andries et al., 2012, pour plus de détails).

5.4 SITE PILOTE DE LA LÔNE DU BEURRE

L'île du Beurre, se trouve à proximité de la ville de Condrieu, à 10 km au sud de Vienne.

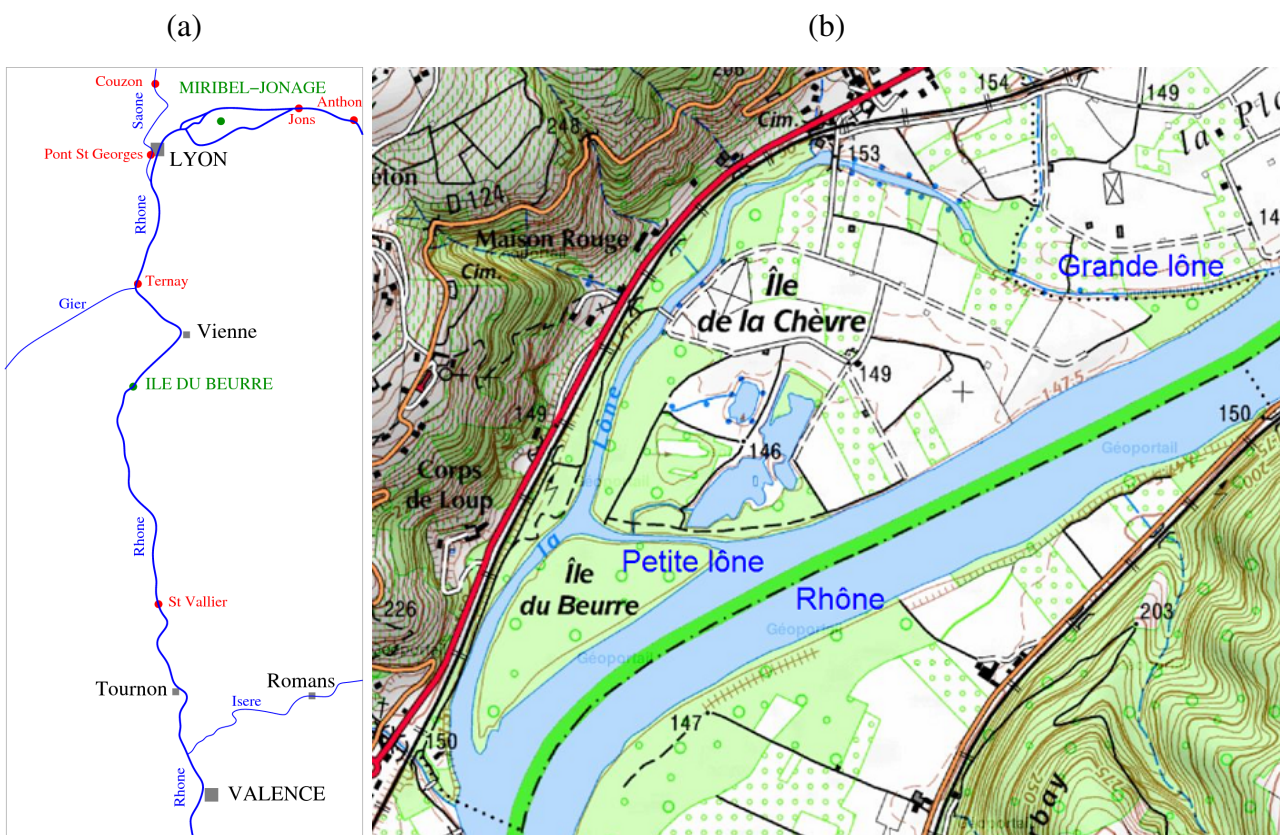


Figure 17 : Localisation (a) et description (b) du site pilote de la lône du Beurre (Geoportail)

À ce niveau, le Rhône, d'une largeur moyenne de 200 m, présente deux bras secondaires en rive droite appelés lônes. Ces voies d'eau secondaires délimitent deux îlots, l'île du Beurre et l'île de la Chèvre (Figure 17). On distingue la grande lône (ou lône de la Chèvre) qui s'étend sur près de 2700 m le long du chenal principal et la petite lône (ou lône du Beurre), qui évolue transversalement au Rhône sur 350 m. C'est un site suivi de près par le Centre d'Observation de la nature de l'île du Beurre, où de nombreux relevés sont effectués pour connaître la quantité de dépôt ainsi que sa composition : plusieurs carottages ont été effectués sur la zone. L'intérêt de cette zone d'étude est

donc de recouper les informations entre plusieurs axes du projet Axelera, entre les analyses des carottes et l'étude sédimentaires.

Nous avons donc travaillé en collaboration avec le Centre d'Observation de la Nature de l'île du Beurre, qui nous a fourni de nombreuses données pour ce travail, ainsi qu'avec Artelia et le Cerege (voir Camenen et al., 2012, pour plus de détails).

5.5 MODÈLE DU RHÔNE DE LA FRONTIÈRE SUISSE À L'ISÈRE

La construction de ce modèle est l'objet du présent rapport, et s'articule en trois grandes étapes :

- Recueil des données : il a fallu dans un premier temps recueillir le maximum d'informations topographiques sur le cours d'eau, et les traiter en conséquence pour réaliser la modélisation hydraulique du Rhône ; puis recueillir les données hydrologiques pour chacun des affluents ; et enfin rassembler des données sédimentaires pour caractériser la composition en MES du Rhône et de ses affluents.
- Mise en place du modèle hydraulique : la deuxième étape a ensuite consisté à paramétrer et caler le modèle hydraulique pour s'approcher au plus près du fonctionnement effectif du Rhône et de ses aménagements.
- Mise en place du modèle sédimentaire : enfin, nous avons couplé le modèle hydraulique au modèle de transport de sédiment, pour lequel il a fallu renseigner les informations sur les caractéristiques des sédiments rencontrés dans le Rhône et ses affluents (diamètre, masse volumique...) ainsi que leurs flux (concentrations de sédiments mesurées lors de crue mais également en temps normal ou d'étiage).

La description technique et complète du travail sur la modélisation hydro-sédimentaire du Rhône est développée dans les paragraphes suivants.

6 RECUEIL DES DONNÉES

Pour la construction de notre modèle hydraulique, nous avons eu recours à différentes sources de données topographiques, bathymétriques et hydrologiques.

6.1 DONNÉES TOPOGRAPHIQUES ET BATHYMÉTRIQUES

6.1.1 ORIGINE DES DONNÉES

Pour une grande partie de la géométrie du lit et de la rivière, nous avons utilisé les données issues de la Banque de Données Topographiques Rhône (BDT Rhône) de l'IGN. Par l'intermédiaire de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, l'IGN a regroupé le maximum de données disponibles sur le Rhône auprès des différents acteurs tels que la CNR, EDF, VNF. Ainsi nous avons pu construire la majorité du modèle à partir de données fiables. Les données de la BDT Rhône couvrent l'ensemble du linéaire du Rhône français.

Cependant certains secteurs n'étaient pas couverts par la BDT Rhône, tels que certains bras des sites pilotes de Miribel-Jonage et de la lône du Beurre. Sur le secteur de Miribel-Jonage nous avons donc utilisé les informations topographiques issues du modèle construit par Burgeap en 2001. Nous avons également complété ces données par des mesures topographiques de terrain, que nous avons réalisées avec les techniciens de Irstea. Ces mesures ont été réalisées dans le but de mieux modéliser les diffluences entre les différents bras. Pour la lône du Beurre, le travail en collaboration avec Artelia et le Cerege nous a permis de récupérer les données du Centre d'Observation de la Nature de l'île du Beurre.

Localement le modèle a également pu être précisé grâce à des données de la CNR sur certaines zones limitées (aux environs du barrage de Génissiat par exemple), ou encore des données internes de Irstea issues de précédentes études (le Rhône de Sault-Brénaz à Lyon, équipe Dynam).

6.1.2 PROBLÈMES ET LIMITES

– *Système de coordonnées*

Les différentes données topographiques n'étant pas dans le même repère, de légères modifications et de légères erreurs de conversion sont possibles.

En effet les données de la BDT Rhône sont géoréférencées et exprimées en Lambert 93. Pour chaque point d'un profil, un jeu de coordonnées X, Y et Z permet une localisation spatiale tandis que les données de Burgeap sont exprimées, pour chaque point, en coordonnées « relatives » : abscisses/cotes associées à un point kilométrique qui permet de savoir à quel niveau du bief nous sommes. Les coordonnées Burgeap ne sont donc pas localisées spatialement dans un système (Figure 18, gauche).

Pour avoir des données homogènes, nous avons géoréférencé les profils en travers de Burgeap dans le système de coordonnées de la BDT Rhône (Lambert 93). La définition des coordonnées par Burgeap nous a permis de localiser de manière assez précise les profils, mais ne permet pas d'éviter une marge d'erreur dans leur géoréférencement.

Certaines autres données topographiques récupérées n'étant pas dans le bon repère (Lambert II ou II étendu), nous avons utilisé le logiciel CIRCE de l'IGN pour transformer correctement les données dans le repère Lambert 93.

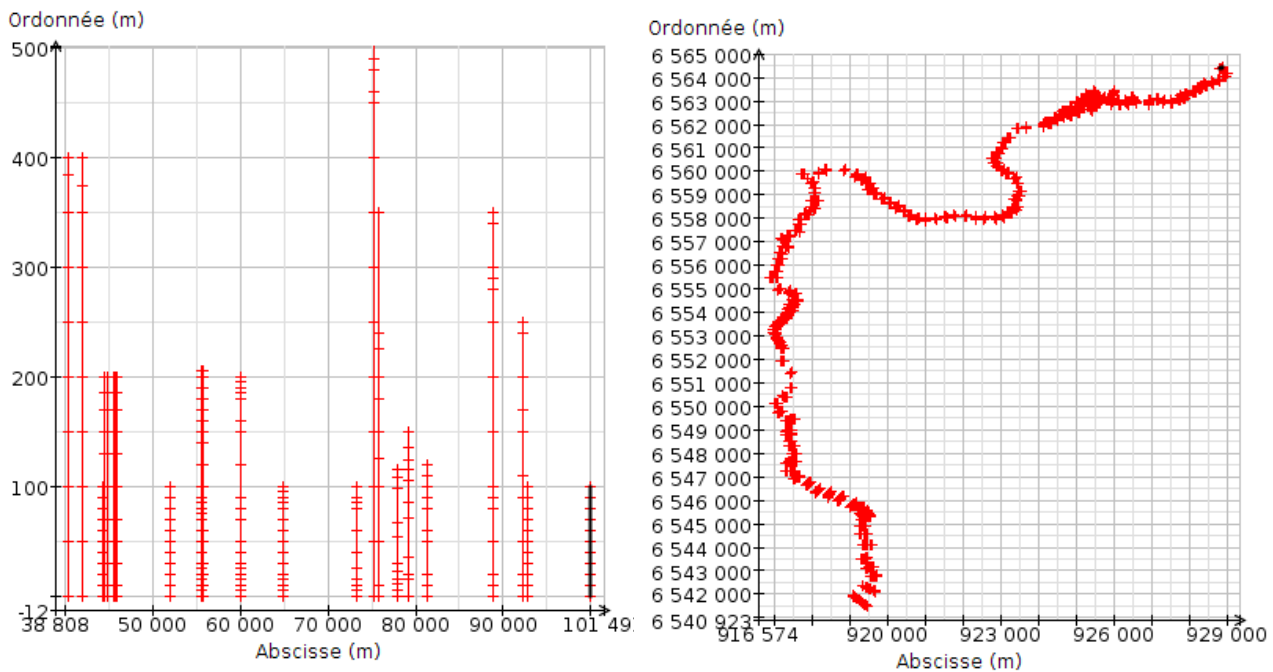


Figure 18: Représentation géométrique du modèle 1D du Rhône entre la frontière et Motz (a) en coordonnées relatives (abscisses/cotes) et avant ajout des nouvelles données, (b) en coordonnées géoréférencées xyz après ajout des nouvelles données.

– Berges

Sur certains tronçons issus de la BDT Rhône, les berges sont peu ou pas représentées dans les profils en travers du Rhône. Il a donc fallu extrapoler des cotes de berge, grâce à la carte IGN ou grâce à des visites de terrain qui permettent d'estimer la hauteur des berges.

– Problèmes liés à la BDT

La BDT est un outil qui s'est avéré extrêmement important et efficace pour notre travail, toutefois on y dénombre un certain nombre d'erreurs ou d'insuffisances, dont quelques-unes sont détaillées ci-dessous :

- Convention de numérotation des Pk par la CNR. Au niveau des barrages sur les bras du Rhône aménagé, les profils précédant et suivant le barrage peuvent être distants de plusieurs kilomètres selon les Pk indiqués par la BDT (et donc par la CNR) alors que dans les faits il n'y a que quelques dizaines de mètres. Ce problème (pour nous) découle de la convention utilisée par la CNR pour mesurer les distances et fixer les Pk dans ses modèles. En effet la CNR base les Pk de ses modèles sur les Vieux-Rhône. Ceux-ci étant plus long que les Rhône Aménagés, une fois à la confluence Vieux-Rhône / Rhône Aménagé on trouve une différence de kilométrage. Pour la CNR qui possède des modèles du Rhône par morceaux, ceux-ci s'arrêtant et commençant au niveau des barrages, il n'y a donc pas de conséquence d'avoir ces différences de kilométrage. Tandis que dans notre cas, un écart de quelques kilomètres au lieu de quelques mètres implique un problème dans le maillage de la rivière. Il a donc fallu remesurer manuellement l'espacement entre profils au niveau de chaque barrage sur un logiciel SIG.

- Une certaine quantité de données (au niveau du barrage de Génissiat et de Seyssel) est manquante dans la BDT alors que ces données existent de façon évidente. Cela a induit quelques difficultés pour la modélisation de ces sites particuliers.
- Les profils fournis dans la BDT sont orientés de la rive droite à la rive gauche. Cependant quelques erreurs se sont glissées et il y a régulièrement des profils orientés dans le sens inverse. Ceci crée un problème lors du maillage (extrapolation de profils intermédiaires entre deux profils renseignés à un pas d'espace choisi). Il convient donc de vérifier l'orientation de tous les profils, ce qui n'est pas un travail négligeable.
- Tous les profils fournis par la BDT sont nommés selon une convention, par exemple PRB-118.85dAM. Pour quelques un de ces profils une virgule s'est glissée à la place du point provoquant une incompréhension du nom par le logiciel et une erreur dans l'importation des données (exemple : PRB-118,85dAM).

6.2 *DONNÉES HYDROLOGIQUES*

La simulation du comportement d'un cours d'eau passe par l'étude hydrologique de celui-ci. Dans notre cas il s'agit donc de déterminer l'hydrologie du Rhône mais aussi de tous ses principaux affluents. L'étude hydrologique est nécessaire pour indiquer les conditions limites du modèle, à l'amont et à l'aval. À l'amont de chaque cours d'eau représenté (le Rhône et ses affluents modélisés, comme la Saône, etc....) il est nécessaire de définir un hydrogramme, tandis qu'à l'aval du modèle une courbe de tarage est nécessaire.

L'étude hydrologique a consisté à :

- relever auprès de la banque hydro les données relatives aux cours d'eau (débits) au niveau d'une station de mesure proche de la confluence avec le Rhône,
- vérifier les données issues de ces stations (au moins 10/20 ans de données et plus si possible),
- traiter les données pour les intégrer à PAMHYR.

6.2.1 *CONDITIONS AUX LIMITES ENTRANTES*

Entre la frontière suisse et la confluence avec l'Isère, trois conditions aux limites entrantes ont été renseignées :

- pour le Rhône au niveau de la sortie du lac Léman, c'est à dire à l'amont du modèle ;
- pour l'Ain, au plus proche de sa confluence avec le Rhône ;
- pour la Saône, également au plus proche de sa confluence avec le Rhône.

L'Ain et la Saône sont les deux seuls affluents importants sur cette partie du Rhône à avoir été modélisés sur quelques kilomètres avant leur confluence avec le Rhône. Les informations concernant l'hydrologie de ces deux rivières et du Rhône ont été trouvées auprès de la banque Hydro¹. Il sera possible par la suite de rajouter au modèle du Rhône les autres affluents si besoin. Le résumé des stations et données récupérées est donné dans le tableau 2 .

¹ www.hydro.eaufrance.fr

Tableau 2: Liste des données disponibles pour le Rhône , l'Ain et la Saône et ses affluents, de l'amont à l'aval, présents sur la zone d'étude.

Cours d'eau	Nom station	Distance approximative à la confluence	Chronique de données
Le Rhône	Pougny	À 20 km du Lac Léman et première station de mesure en France	86 ans
L'Ain	Port Galland (CNR)	17 km	53 ans
La Saône	Couzon (CNR)	10 km	31 ans

- Le Rhône (Pougny)

Les données les plus à l'amont du Rhône français que nous ayons récupérées se situent au niveau du barrage franco-suisse de Chancy-Pougny. Les valeurs remarquables qui en découlent sont décrites Figure 19 et Tableau 3.

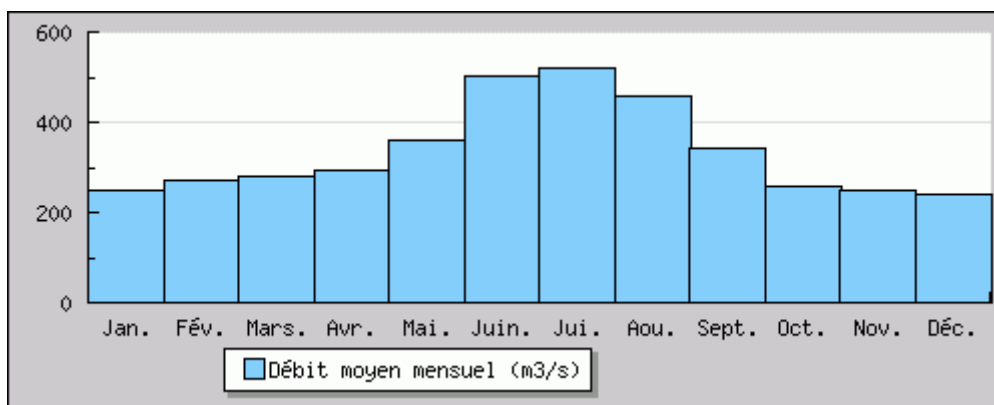


Figure 19 : Écoulements moyens mensuels du Rhône à Pougny. Données calculées sur 86 ans, Banque HYDRO.

Tableau 3 : Débits caractéristiques du Rhône à Pougny (loi de Galton - janvier à décembre) - données calculées sur 86 ans.

	Période de retour	Débit en m³/s
Module (Moyenne)	inter-annuelle	336
Étiage : VCN3 ⁽¹⁾	2 ans	130
	5 ans	100
Crue : QJ ⁽²⁾	2 ans	800
	5 ans	930
	10 ans	1000
	20 ans	1100
	50 ans	1200

1 VCN3 : débit moyen minimal calculé sur 3 jours consécutifs.

2 QJ : débit moyen journalier maximal

- L'Ain à Chazey-sur-Ain

Les valeurs remarquables données par la station de Port Galland sur la commune de Chazey-sur Ain sont décrites Figure 20 et Tableau 4.

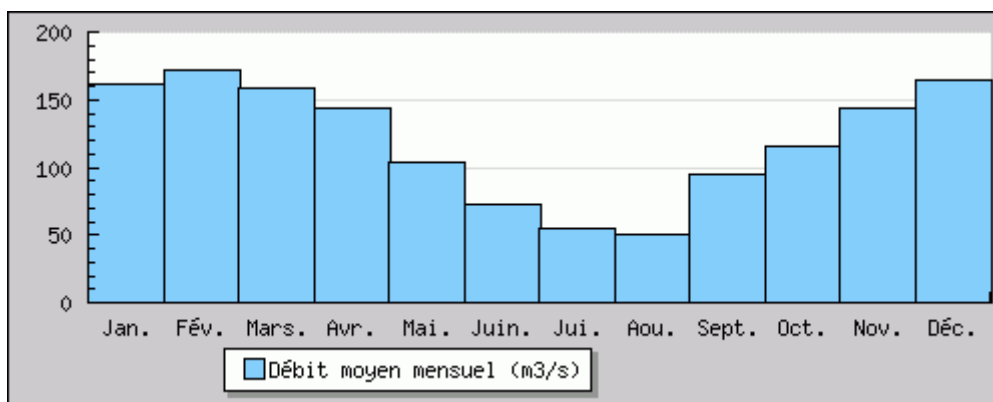


Figure 20 : Écoulements moyens mensuels de l'Ain au Pont de Port Galland. Données calculées sur 53 ans. Banque HYDRO.

Tableau 4 : Débits caractéristiques de l'Ain au Pont de Port Galland (loi de Galton - janvier à décembre) - données calculées sur 53 ans.

	Période de retour	Débit en m ³ /s
Module (Moyenne)	inter-annuelle	119
Étiage : VCN3 ⁽¹⁾	2 ans	15
	5 ans	11
Crue : QJ ⁽²⁾	2 ans	760
	5 ans	1000
	10 ans	1200
	20 ans	1400
	50 ans	1600

- La Saône à Couzon-Au-Mont-d'Or

Les valeurs remarquables données par la station de Couzon-Au-Mont-d'Or sont décrites Figure 21 . Les débits caractéristiques ne sont pas disponibles dans la banque hydro, nous avons donc récupéré des données sur le Serveur de données hydrométriques temps réel du bassin Rhône Méditerranée. Les données publiées sur ce serveur proviennent des réseaux d'hydrométrie des services de l'État du bassin Rhône Méditerranée (DREAL, DDT), ainsi que de leurs partenaires (collectivités territoriales, gestionnaires d'ouvrages hydrauliques, concessionnaires...) Il s'agit de données "temps réel", ni critiquées, ni validées, susceptibles d'être modifiées, et n'ayant aucune valeur officielle. Les valeurs fournies dans le Tableau 5 sont donc indicatives.

1 VCN3 : débit moyen minimal calculé sur 3 jours consécutifs.

2 QJ : débit moyen journalier maximal

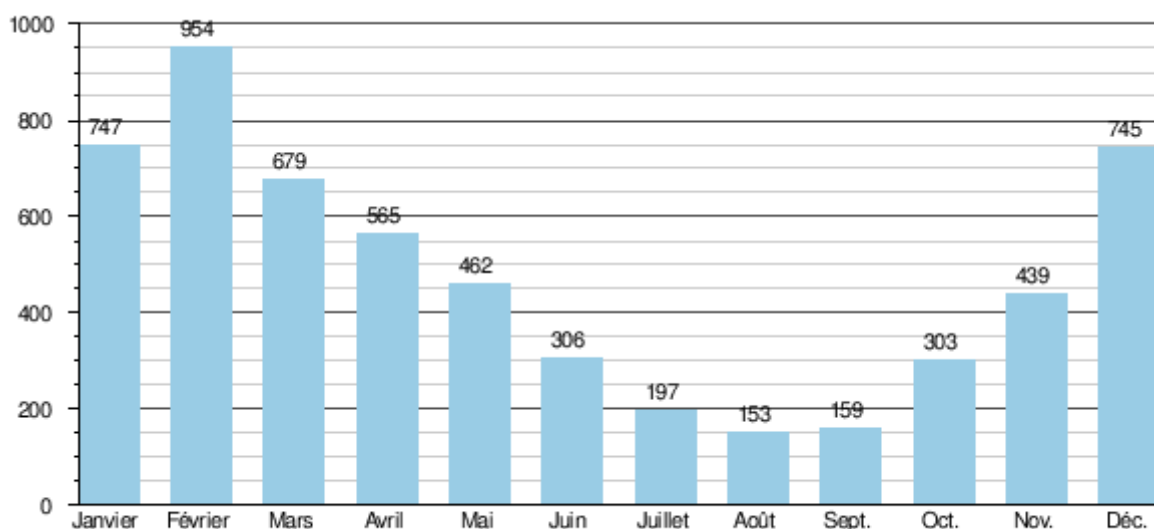


Figure 21: Écoulements moyens mensuels en m³/s de la Saône à Couzon-Au-Mont-d'Or.

Tableau 5 : Débits caractéristiques de la Saône à Couzon-Au-Mont-d'Or.

	Période de retour	Débit en m³/s
Module (Moyenne)	inter-annuelle	473
Étiage : VCN3 (¹)	5 ans	63
Crue : QJ (²)	10 ans	Environ 2190
	20 ans	Environ 2400
	50 ans	Environ 2820

6.2.2 APPORTS PONCTUELS

Quelques affluents sont définis dans le modèle en tant qu'« apport ponctuels ». Cela signifie qu'il n'y a pas besoin de définir la topographie du cours d'eau mais qu'il suffit d'indiquer uniquement un apport ponctuel au point où celui-ci rejoint le Rhône. Les apports ponctuels se définissent donc au niveau d'un nœud du réseau. Pour éviter de multiplier les nœuds et donc les biefs, certains cours d'eau ont été rattachés au même nœud car tous les deux proches de celui-ci. Par la suite il pourrait être intéressant de créer de nouveaux nœuds et donc de découper les biefs pour obtenir le lieu exact où les affluents rejoignent le Rhône.

Les apports ponctuels permettent d'obtenir un débit « ajusté » en fonction des kilomètres parcourus pour obtenir, à la confluence avec l'Isère, un débit qui correspond à la réalité du lieu. Les données intégrées au modèle sont présentées dans le Tableau 6. Le module inter-annuel est le débit qui sera par la suite utilisé pour la modélisation.

Cependant nous manquons de données pour l'un des affluents : le canal de Savières. Nous connaissons uniquement son module inter-annuel calculé sur 13 ans.

1 VCN3 : débit moyen minimal calculé sur 3 jours consécutifs.

2 QJ : débit moyen journalier maximal

Tableau 6: Liste des données disponibles pour les affluents du Rhône de l'amont à l'aval, présents sur la zone d'étude à l'exception de l'Ain et la Saône présentés aux Tableaux 4 et 5, ainsi que leurs apports ponctuels définis pour le modèle (Données issues de la Banque Hydro).

Cours d'eau	Nom station	Distance à la confluence	Chronique de données	Module inter-annuel (m ³ /s)	Nom nœud	du
La Valserine	Lancrans (le Viret)	2 km	25 ans	15,3	FRO	
Les Usses	Musièges (Pont des Douattes)	5 km	108 ans	3,2	FRO	
Le Fier	Vallières	10 km	61 ans	41,3	MTZ	
Canal de Savières				10,3	LAV	
Le Furans	Arbignieu (pont de Peyzieu)	1,5 km	39 ans	3,6	BRE	
Le Guiers	Belmont-Tramonet	8 km	7 ans	16	BCO	
La Bourbre	Tignieu-Jameyzieu	4 km	101 ans	7,5	ANT	
L'Yzeron	Francheville (Taffignon)	5 km	25 ans	0,7	PRH	
Le Gier	Givors	1 km	14 ans	3,2	TRN	
La Gère	Jardin	5 km	14 ans	3,2	VAU	
La Cance	Sarras	1 km	48 ans	4,2	CHP	
La Galaure	Saint-Uze	5 km	30 ans	2,2	ARA	
Le Doux	Tournon-sur-Rhône	1 km	42 ans	5,1	GRV	

6.2.3 CONDITION À LA LIMITE AVAL

Une courbe de tarage au niveau du point le plus aval du modèle (amont confluence avec l'Isère) est également nécessaire pour réaliser l'étude, puisque nous sommes en régime fluvial.

Grâce au logiciel MAGE, il est possible de générer une courbe de tarage à l'aval du modèle basée sur la formule de Manning-Strickler en condition permanente sur le dernier tronçon. Ce n'est pas gênant que cette courbe de tarage soit générée par Mage plutôt que basée sur une courbe de tarage issue de mesures et d'observations vérifiées. En effet la condition limite aval n'a pas vraiment d'importance car le niveau à l'amont du dernier barrage ne dépend pas du niveau à l'aval sauf en cas de crue où l'écoulement redevient naturel ((voir paragraphe 4.2). Et lorsque l'écoulement redevient naturel la condition limite aval générée par Mage est correcte.

6.3 DONNÉES SÉDIMENTAIRES

Les données disponibles de mesures de MES sur le Rhône sont malheureusement assez peu nombreuses. Nous ne disposons que de celles de l'agence de l'eau RMC qui ne procèdent à des mesures que ponctuellement à raison d'un prélèvement par mois environ. Nous nous baserons donc sur les caractéristiques des sédiments présents sur la zone de Miribel Jonage (cf. Andries et al., 2012).

6.3.1 CARACTÉRISTIQUES DES SÉDIMENTS

Nous faisons donc l'approximation que les sédiments retrouvés à l'amont de Lyon sont sensiblement les mêmes que ceux présents sur le Rhône au niveau de la frontière avec la Suisse, l'apport en sédiments étant très faibles entre ces deux points (on le considère même négligeable et donc nul par la suite dans notre modélisation). Nous utilisons donc les mêmes caractéristiques.

La Figure 22 représente la courbe granulométrique des MES prélevées à Jons (Miribel Jonage). Cette courbe permet de connaître les caractéristiques des sédiments retrouvés à Jons. Les valeurs remarquables que l'on déduit de ces mesures (Figure 22) sont :

- plus de 90 % des MES correspondent à des argiles et des limons ($d < 50 \mu\text{m}$),
- le diamètre médian des MES est environ $8 \mu\text{m}$.

	%
Argiles ($0 - 2 \mu\text{m}$)	13,1
Limons fins ($2 - 20 \mu\text{m}$)	61,9
Limons grossiers ($20 - 50 \mu\text{m}$)	19,3
Sables fins ($50 - 200 \mu\text{m}$)	5,1
Sables grossiers ($200 - 2000 \mu\text{m}$)	0,6
total	100

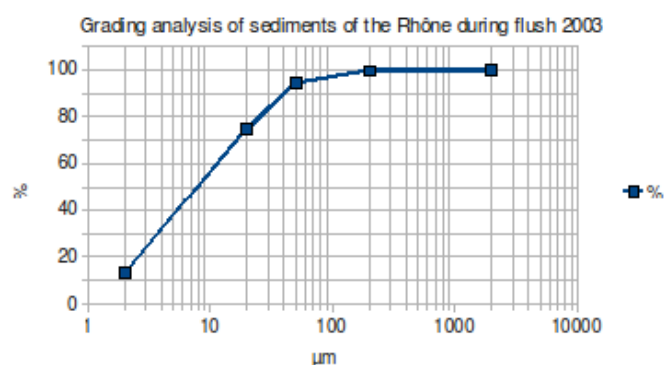


Figure 22: Distribution granulométrique des MES à Jons lors de la chasse de 2003 (données CNR).

Dans nos simulations nous avons utilisé 3 classes de sédiments ayant le diamètre moyen suivant :

- $8 \mu\text{m}$, qui correspond à 65% des sédiments en suspension observés à Jons,
- $20 \mu\text{m}$, qui correspond à 25% des sédiments en suspension observés à Jons,
- $50 \mu\text{m}$, qui correspond à 10% des sédiments en suspension observés à Jons.

On effectue ensuite une combinaison des résultats de dépôt pour calculer le résultat correspondant à un mélange de ces 3 classes comprenant 65% de sédiments avec $d = 8 \mu\text{m}$, 25% de sédiments avec $d = 20 \mu\text{m}$, et 10% de sédiments avec $d = 50 \mu\text{m}$, soit :

$$M_{\text{dépôt}} = 0,65 M_{\text{dépôt } 8\mu\text{m}} + 0,25 M_{\text{dépôt } 20\mu\text{m}} + 0,10 M_{\text{dépôt } 50\mu\text{m}}$$

Nous utiliserons donc ces valeurs pour nos simulations pour tous les affluents.

6.3.2 CONCENTRATION SÉDIMENTAIRE

Les principaux apports en sédiments proviennent du Rhône et de la Saône, les apports de l'Ain étant supposés négligeables devant ceux-ci.

Les données sur ces cours d'eau en terme de concentration de sédiments dans l'eau n'ont pas pu être exploitées dans notre cas, car :

- d'une part il y a peu de données de ce type ou seulement sur des événements ponctuels or nous voulons modéliser sur une longue durée,

- et d'autre part les données ne sont pas forcément localisée au bon endroit pour notre étude.

Pour obtenir leur concentration en MES, nous nous sommes donc basé sur une estimation de la concentration en fonction d'une relation entre la concentration et le débit, du type :

$$C = aQ^b \quad (7)$$

avec C la concentration en MES en g/l, Q le débit total en m³/s, a et b des coefficients empiriques dépendant des caractéristiques propres du bassin et du potentiel de remise en suspension dans la rivière.

Des données de débit horaire utilisées pour cette étude ont été récupérées sur la Banque Hydro aux stations d'Anthon (CNR, Rhône) et Couzon (CNR, Saône). Les données de MES utilisées correspondent à des mesures de turbidité réalisées par Irstea sur les sites de Jons (Rhône) et à la passerelle Saint Georges (Saône à Lyon). Ces données s'étalent sur les périodes suivantes :

- Anthon (Rhône) : débit horaire Q de 1979 à 2011,
- Couzon (Saône) : débit horaire Q de 1981 à 2011,
- Jons (Rhône) : concentration C tous les 30 mn de septembre 2010 à décembre 2011,
- Saint Georges (Saône) : concentration C tous les 2 mn de septembre 2009 à novembre 2010 (chronique non complète).

Pour chacune de ces stations, les concentrations sont présentées en fonction des débits en se basant sur des moyennes horaires et des moyennes journalières, permettant ainsi de déterminer les coefficients a et b de la loi puissance entre la concentration en MES et le débit pour le Rhône en amont de Lyon et la Saône à Lyon (Figure 23) :

$$\text{Rhône :} \quad a = 2.10^{-9} \quad b = 2,5 \quad C_{\text{Rhône}} = 2.10^{-9} Q_{\text{Rhône}}^{2,5} \quad (8)$$

$$\text{Saône} \quad a = 3.10^{-5} \quad b = 1,1 \quad C_{\text{Saône}} = 3.10^{-5} Q_{\text{Saône}}^{1,1} \quad (9)$$

Il est à noter que les moyennes journalières permettent de lisser les résultats mais ne peuvent prendre en compte des phénomènes ponctuels tels que les éclusés.

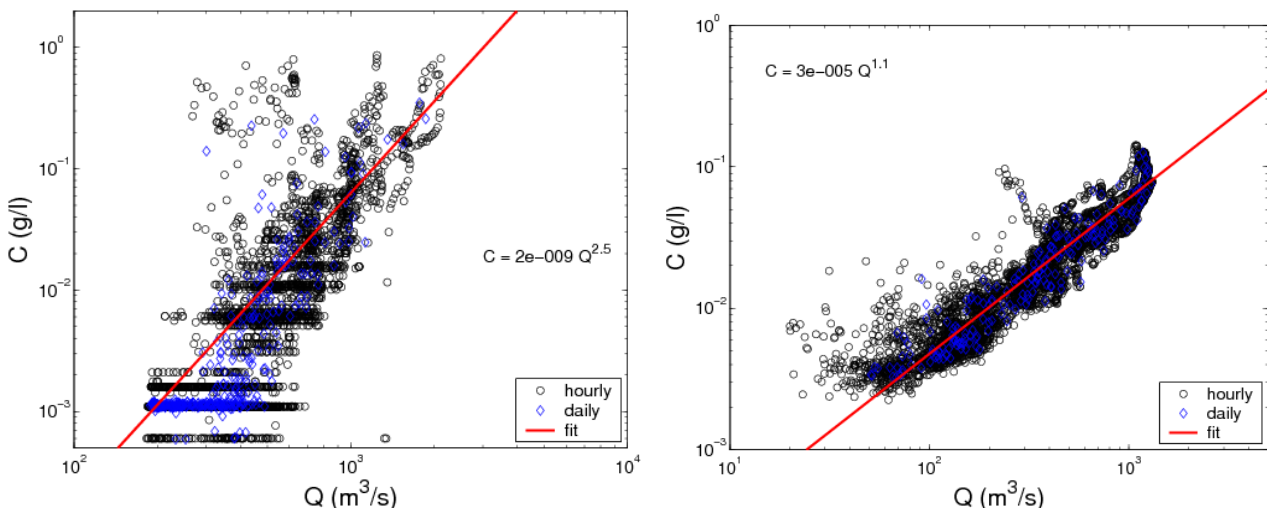


Figure 23: Relation entre les mesures de concentrations et débit sur le Rhône en amont de Lyon et sur la Saône à Lyon.

7 MISE EN PLACE DU MODÈLE HYDRAULIQUE : PARAMÉTRISATION

7.1 PRÉSENTATION

Dans cette section, nous décrivons les principales paramétrisations du modèle hydraulique Mage. Tout d'abord, voici un schéma du Rhône modélisé sous PamHyr-Mage (rotation sur la gauche).

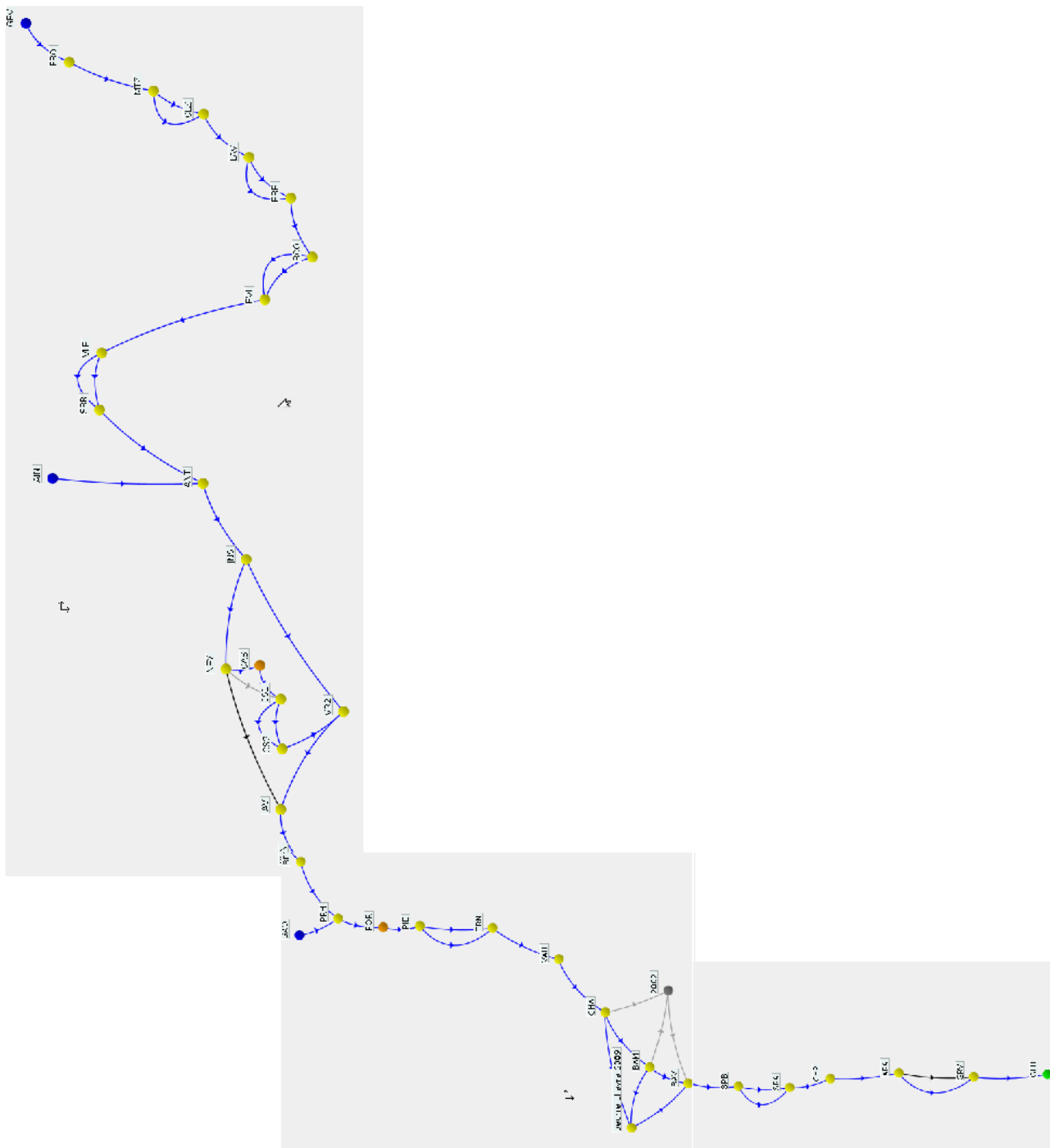


Figure 24: Schéma global du Rhone modélisé sous PamHyr.

Cette représentation est une représentation schématique du Rhône (qui n'est donc pas à l'échelle) telle que l'on peut la voir sous l'interface graphique PamHyr.

Chaque point jaune correspond à un nœud, qui permet de relier chaque bief et les biefs sont représentés en bleu. Sur ce modèle on peut voir trois biefs gris qui correspondent à des biefs désactivés. En effet au niveau de la lône du beurre nous avons le choix entre deux géométries :

- une géométrie de la lône datant de 2002, juste après une opération de déblaiement des sédiments accumulés dans celle-ci,
- une géométrie de la lône datant de 2009, après 7 années de fonctionnement naturel du Rhône et dans ce cas de dépôt de sédiments.

On peut donc faire tourner le modèle avec l'une ou l'autre géométrie et prenant soin de désactiver celle inutilisée.

Ce schéma n'étant pas à l'échelle, certaines zones se trouvent prendre une place importante au vue de leur complexité par rapport au reste. Par exemple la zone de Miribel-Jonage qui, en réalité, serait beaucoup plus restreinte, mais, de part sa complexité, elle prend ici une place importante. On dénombre sur ce modèle :

- 50 biefs, dont 3 désactivés,
- 37 nœuds, dont un nœud amont (bleu), un nœud aval (vert), deux nœuds associées à des lois de casiers (oranges).

Les biefs sont rangés par ordre décroissant :

- amont du Rhône : bief 47,
- aval : bief 1.

7.2 COEFFICIENTS DE STRICKLER

Le coefficient de Strickler permet de définir la résistance à l'écoulement (perte de charge) ainsi que la rugosité du lit d'une rivière, d'une paroi d'un chenal, en fonction de sa nature (gravier, herbe, béton, ...). Une valeur élevée du coefficient correspond à une rugosité faible. Le coefficient de Strickler K se déduit de la formule de Manning-Strickler qui exprime la pente de la ligne de charge :

$$J = \frac{|Q|Q}{D^2} \text{ avec } D = K.S.R_H^{2/3} \quad (10)$$

avec : J la perte de charge, Q le débit, S la section mouillée et Rh le rayon hydraulique, D la débitance et K le coefficient de Manning-Strickler.

Burgeap a effectué un travail de calage des coefficients de Strickler sur son modèle du Rhône amont (de la frontière suisse à l'amont de Lyon) que nous avons réutilisé. Les couples de coefficients de Strickler pour les lits mineurs et moyens sont présentés en annexe A. Sur chaque tronçon sont définis les frottements, en fonction du PK. Un exemple est présenté sur le Tableau 7 et la Figure 25.

Tableau 7: Frottements définis pour le tronçon du canal de Miribel aval.

PK début (km)	PK fin (km)	Strickler, lit mineur (m ^{1/3} /s)	Strickler, lit moyen (m ^{1/3} /s)
-13,000	-12,200	13,0	13,0
-12,200	-11,600	13,0	15,0
-11,600	-11,300	15,0	15,0
-11,300	-10,000	18,0	18,0
-10,000	-9,000	18,0	20,0

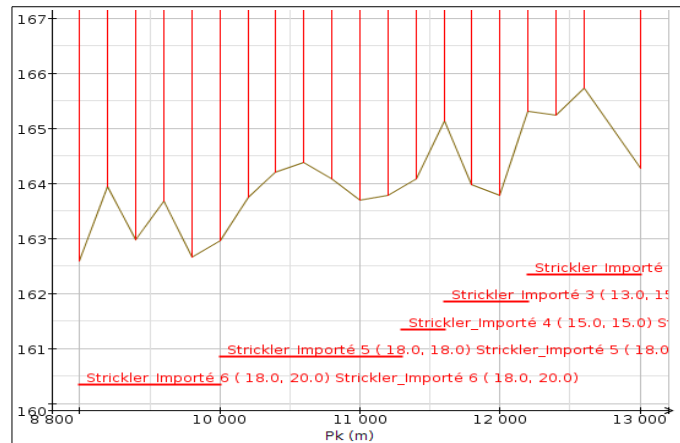


Figure 25: Profil en long du tronçon et frottements associés, canal de Miribel aval.

L'étape de calage du coefficient de Strickler est une étape importante. En effet la valeur de ce coefficient de frottement a une influence importante sur la vitesse, les hauteurs d'eau et le débit, notamment là où il y a plusieurs bras, et donc sur la répartition de débits entre les bras. Pour exemple, à une diffluence au lieu d'avoir une répartition de 1/3 du débit dans le bras 1 et 2/3 dans le bras 2 on obtenait 1/6 dans le bras 1 et 5/6 dans le bras 2. La question de l'exactitude de la répartition du débit dans un système maillé (plusieurs bras) est délicate, comme nous le présentons ci-dessous. Le coefficient de frottement a aussi un impact sur l'estimation du coefficient de dispersion et donc sur la dynamique du transport des MES.

7.3 RÉPARTITION DES DÉBITS AUX DIFFLUENCES

Il y a différents types de diffluences traitées dans MAGE :

- Les diffluences où la répartition des débits est gérée par un barrage, comme l'indique le schéma classique des aménagements du Rhône (cf. Figure 26).
- Les diffluences où la répartition des débits se fait en fonction du débit et de la géométrie. Dans ce cas là, la répartition des débits par MAGE se fait de façon naturelle sous les contraintes de géométrie et d'écoulement à l'aval de chacun des bras défluent de façon à conserver l'égalité des niveaux à l'endroit de la séparation des flux. Pour ce dernier type de diffluence, nous avons réalisé des mesures pour savoir si la répartition du débit dans le modèle était proche de la réalité et nous avons modifié le modèle si nécessaire.

La plupart des répartitions de débits sur notre modèle se font par l'intermédiaire d'un barrage, car ce sont des zones d'aménagements classiques de la CNR ou de EDF où le Rhône se sépare en deux bras avec un Vieux-Rhône et un Rhône Aménagé. Cependant sur nos deux sites pilotes, Miribel-Jonage et la lône du Beurre, on trouve des répartitions naturelles de débit. Ces répartitions ont été délicates à caler avec précision, car comme on l'a dit précédemment, les valeurs de frottements ainsi que la géométrie du cours d'eau influencent fortement cette répartition. Il a donc fallu effectuer des mesures de terrain plus poussées pour vérifier l'exactitude du modèle et le corriger si-besoin avec de la topographie complémentaire ou des modifications des frottements.

7.3.1 RÉPARTITION DES DÉBITS PILOTÉE PAR UN BARRAGE

Sur tout le linéaire du Rhône français, on trouve 19 aménagements CNR et un aménagement EDF, soit 20 aménagements. Comme on peut le voir sur la Figure 3, seulement trois aménagements appelés « barrage-usine » (Génissiat et Seyssel à l'amont et Vaugris à l'aval de Lyon) fonctionnent sans canal de dérivation mais sur la totalité de la largeur du Rhône. Par contre tous les autres aménagements CNR et l'aménagement EDF fonctionnent selon le principe décrit en Figure 26.

On peut noter également la présence d'un dernier barrage-usine, celui de Chancy-Pougny à la frontière franco-suisse, géré par la Société des Forces Motrices de Chancy-Pougny (SFMPC), qui est une société franco-suisse.

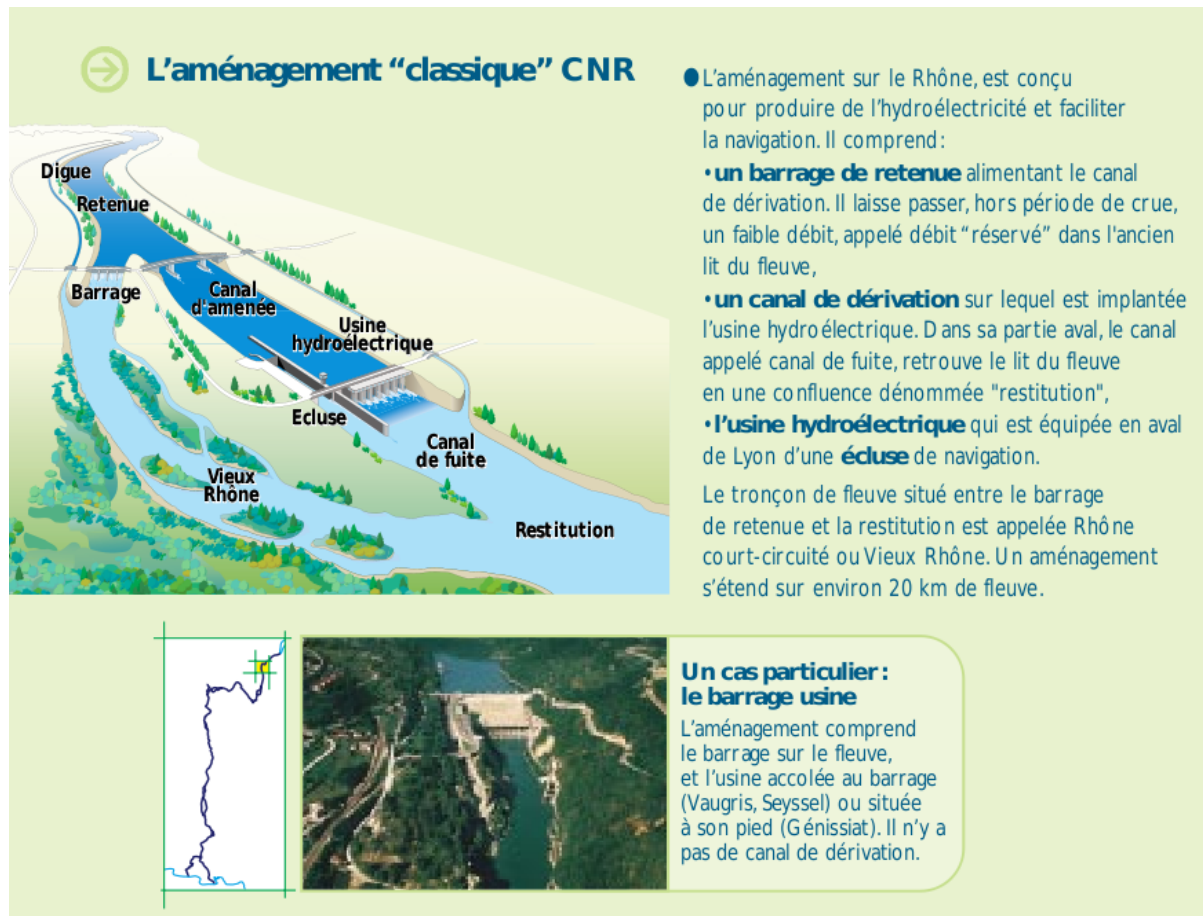


Figure 26: Aménagement classique du Rhône, (Institution interdépartementale des bassins Rhône-Saône).

Pour notre modèle nous sommes donc en présence de nombreuses diffluences gérées par un barrage de retenue. En termes de modélisation, cela se traduit par :

- la modélisation du barrage : on associe à une section une loi d'orifice et une loi de seuil,
- on associe à la loi d'orifice une règle de régulation qui permet de spécifier le débit réservé dans le Vieux-Rhône, ainsi que le débit maximum turbiné, qui est le débit maximum que peut accepter l'usine et donc le canal de dérivation et au-delà duquel le débit est basculé dans le Vieux-Rhône (lors des crues donc).

Sur ces difffluences, la répartition de débit est donc fixée par des lois que nous avons nous-mêmes spécifiées, quelle que soit l'incertitude liée à la géométrie entrée ou aux coefficients de frottement. Ce qui n'est pas le cas des répartitions « naturelles ».

Il est à noter que cette gestion des débits donne des résultats cohérents en fonctionnement normal même si elle ne peut reproduire la gestion réelle des débits faite par les gestionnaires de barrage. Par contre, elle ne peut reproduire un fonctionnement exceptionnel tel que la mise en « transparence » d'un barrage lors d'une chasse ou d'une crue. C'est une limite importante du modèle actuel qui devra être résolue par la suite.

7.3.2 RÉPARTITION DES DÉBITS À UNE DIFFLUENCE « NATURELLE »

Comme expliqué en 7.3, dans ce type de difffluence la répartition des débits se fait de façon naturelle sous les contraintes de géométrie et d'écoulement à l'aval de chacun des bras défluent. Ce type de répartition est très sensible à la forme et l'altitude des sections précédant et suivant les confluences ou difffluences, ainsi qu'au coefficient de Strickler (frottements) renseigné dans chacun des bras.

On peut noter la présence de ce type de répartition dans la zone de Miribel-Jonage où nous en retrouvons deux fois de suite dans une zone de ramification complexe (voir Andries et al., 2012, pour plus de détails).

7.4 LES CASIERS DE STOCKAGE

Un casier permet de simuler le stockage d'eau dans une zone latérale séparée de l'écoulement principal. L'échange de volume se fait par un débit latéral (positif ou négatif) estimé à partir de la différence de cote entre l'écoulement principal et le casier latéral.

Nous avons modélisé un casier sur la zone de Miribel-Jonage (voir Andries et al., 2012, pour plus de détails) ainsi qu'au niveau du port de Lyon Perrache. Nous les avons construits à partir des données fournies par la BDT et IGN.

7.5 LES OUVRAGES HYDRAULIQUES

Comme expliqué au paragraphe 7.3.1 et Figure 26, de nombreux aménagements hydrauliques et donc de nombreux ouvrages hydrauliques sont présents sur la zone d'étude. On retrouve :

- le barrage usine,
- le barrage de retenue sur le Vieux-Rhône,
- l'usine sur le canal d'aménagé ou encore appelé Rhône aménagé,
- ainsi que quelques seuils naturels.

7.5.1 MODÉLISATION DES OUVRAGES

Le Tableau 8 indique les hypothèses prises pour la modélisation des ouvrages. Les caractéristiques des seuils/déversoirs et orifices (hauteur à la base et largeur) sont définies afin d'être cohérentes avec les capacités hydrauliques du tronçon. Le modèle gère lui-même l'ouverture de l'orifice afin de respecter les consignes d'exploitation (conditions de débit réservé et de cotes minimums et maximums au niveau de la retenue cf. paragraphe 7.5.2) et débits d'aménagement (cf. paragraphe 7.5.3). Comme précisé dans le paragraphe 7.3.1, cette modélisation des barrages n'est valide qu'en fonctionnement normal. Elle ne peut reproduire un fonctionnement exceptionnel tel que la mise en transparence d'un barrage lors d'une chasse ou d'une crue.

Tableau 8 : Les différents types d'ouvrages modélisés

Ouvrage	Modélisation
Barrage de retenue	deux lois associées : (1) « seuil/déversoir à crête horizontale » (2) « orifice rectangulaire »
Seuil	loi de « seuil/déversoir à crête horizontale » (1)
Usine hydro-électrique du Rhône aménagé	loi de « seuil/déversoir à crête horizontale » (1)
Barrage usine	loi de « seuil/déversoir à crête horizontale » (1)

Le tableau 9 présente une liste des ouvrages présents dans le modèle. Il est à noter que la CNR a pris pour convention un PK nul à Lyon. Les PK sont ensuite comptés positivement vers l'aval.

Tableau 9: Liste et caractéristiques des ouvrages présent sur la partie du Rhône modélisé (les lois de modélisation sont présentées dans le Tab. 8)

Nom dans Mage	PK (km)	Ouvrage	Modélisation
UVER	-196,201	Barrage usine de Verbois	(1)
UCHY	-189,000	Barrage usine de Chancy-Pougny	(1)
UGEN	-162,100	Barrage usine de Génissiat	(1)
USEY	-151,600	Barrage usine de Seyssel	(1)
MTZ	-146,000	Barrage de Motz	(1) + (2)
UCHA	-140,670	Usine de Chautagne	(1)
LAV	-131,630	Barrage de Lavours / Barrage de Savières	(1) + (2)
SEUIL NAT 1	-125,800	Seuil naturel, Vieux-Rhône de LAV à BRE	(1)
SEUIL NAT 2	-117,900	Seuil naturel, Vieux-Rhône de LAV à BRE	(1)
UBLY	-118,545	Usine de Brens à Belley	(1)
CHP	-102,950	Barrage de Champagnieux	(1) + (2)
UBCO	-98,200	Usine de Bregnier-Cordon	(1)
VLB	-63,600	Barrage de Villebois	(1) + (2)
USBR	-62,565	Usine de Sault Brenaz	(1)
JON	-26,400	Barrage de Jons	(1) + (2)
CUSS	-15,700	Usine de Cusset	(1)
SM2	-14,000	Seuil sur le canal de Miribel Amont	(1)
SM1	-9,200	Seuil sur le canal de Miribel Aval	(1) + (1)
BPN	-0,250	Seuil du boulevard périphérique nord	(1)
PBR	5,260	Barrage de Pierre-Bénite	(1) + (2)
UPRB	3,900	Usine de Pierre-Bénite	(1)
UVGI	33,800	Barrage usine de Vaugris	(1)
SPB	50,920	Barrage de Saint Pierre de Bœuf	(1) + (2)
USPB	59,350	Usine de Saint Pierre de Bœuf	(1)
SVL	82,800	Barrage de Saint-Vallier (Arasse)	(1) + (2)
USVL	85,500	Usine de Saint-Vallier (Gervans)	(1)

7.5.2 CONSIGNES D'EXPLOITATIONS

Les consignes d'exploitation nous permettent donc de connaître :

- les niveaux du plan d'eau en fonction du débit, et donc les côtes minimum et maximum que prend le plan d'eau à l'amont du barrage,

- on en déduit la cote maximum de la retenue permettant de modéliser le barrage.

Voir les détails du fonctionnement des barrages et de la consigne d'exploitation au paragraphe 4.2. Pour le moment nous n'avons pas encore réussi à reproduire le fonctionnement des barrages comme expliqué au paragraphe 4.2 tout en respectant les autres obligations telles que le débit réservé.

L'altitude des plans d'eau se trouve donc être assez proche des valeurs indiquées par la consigne d'exploitation, la cote des retenues étant calée en conséquence, mais le niveau d'eau s'élève avec le débit, et l'on n'obtient pas exactement le basculement décrit Figure 14.

Par contre, on cale la cote des seuils des barrages de façon à obtenir les côtes des plans d'eau lorsque le Rhône est en régime moyen (considéré comme le cas le plus fréquent) aux pk indiqués dans les consignes d'exploitations, ainsi que de façon à respecter les débits réservés imposés. Il s'agit donc de trouver l'équilibre entre les deux seuils constituant chacun des aménagements (seuil du barrage et seuil de l'usine) qui permet de respecter au mieux ces deux obligations.

7.5.3 DÉBITS D'AMÉNAGEMENT

Par l'intermédiaire d'une règle de régulation qui leur est associée, les orifices rectangulaires définissant les barrages permettent d'appliquer les débits réservés et débits maximums turbinés dans les Vieux-Rhône et canaux d'amenée (cf. Figure 26). Comme évoqué au paragraphe 7.3.1. Les débits maximums turbinés et débits réservés sont appelés débits d'aménagement. Les valeurs à respecter sont présentées dans le Tableau 10 :

Tableau 10: Débits d'aménagements de la CNR.

Noms Usines	Débits turbinés maximum (m3/s)	Noms Barrages	Débits réservés (m3/s) en 2011												
			J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Usine de Génissiat	750	Barrage de Génissiat	5												
Usine de Seyssel	600	Barrage de Seyssel	sans objet												
Usine d'Anglefort	700	Barrage de Motz	50				70				50				
Usine de Brens	700	Barrage de Lavours / Barrage de Savières	60	90	100	90	80						60		
Usine de Brégnier-Cordon	700	Barrage de Champagneux	min 65 m3/s entre le barrage de Champagneux et la confluence du Guiers												
		aval confluence Guiers	80			100			150			100			80
Usine de Sault-Brénaz	700	Barrage de Villebois	20 (01/01-14/06)				60				20 (16/09-31/12)				
Usine de Pierre-Bénite	1380	Barrage de Pierre-Bénite	100												
Barrage-Usine de Vaugris	1400	Barrage-Usine de Vaugris	sans objet												
Usine de Sablons	1600	Barrage de St-Pierre de Beauf	10				20				10				
Usine de Gervans	1620	Barrage d'Arasse	5				10				5				
Usine de Bourg-lès-Vanlence	2200	Barrage de la Roche-de-Glun	10				20				10				
Usine de Beauchastel	2100	Barrage de Charmes	10				20				10				
Usine de Logis-Neuf	2100	Barrage du Pouzin	10				20				10				
Usine de Châteauneuf-du-Rhône	1850	Barrage de Rochemaure	15 m3/s si Q le débit du Rhône < 560 m3/s 15 + (4 m3/s par tranche de 100 m3/s) si 560 < Q < 1660 60 m3/s si Q le débit du Rhône > 1660 m3/s												
Usine de Bollène	1980	Barrage de Donzère	60												
Usine de Caderousse	2280	Barrage de Caderousse	5												
Usine d'Avignon	1600	Barrage de Villeneuve	5												
Barrage-Usine de Sauveterre	800	Barrage-Usine de Sauveterre	400												
Usine de Beaucaire	2200	Barrage de Vallabrègues	10												

8 EXEMPLE DE RÉSULTATS OBTENUS AVEC PAMHYR MAGE

L'interface graphique PamHyr permet de visualiser le modèle hydraulique simulé par Mage, ainsi que les résultats des simulations. Voici quelques exemples de la modélisations et des tests effectués sur le Rhône modélisé.

8.1 LIGNE D'EAU

Il est possible de visualiser les lignes d'eau, qui représentent la hauteur d'eau du Rhône, sur différents biefs les uns à la suite des autres. Sur la Figure 27, nous pouvons voir les lignes d'eau de 4 biefs, chacune des lignes d'eau relative à un bief étant d'une couleur différente.

Sur le premier bief (en jaune) nous pouvons voir la présence :

- d'un barrage (le barrage usine de Vaugris),
- le plan d'eau à l'amont du barrage,
- et la chute d'eau à l'aval (perte de 5 m de hauteur environ).

Un deuxième barrage se situe sur le dernier bief (en bleu foncé) qui permet de créer le plan d'eau précédent (bief bleu clair).

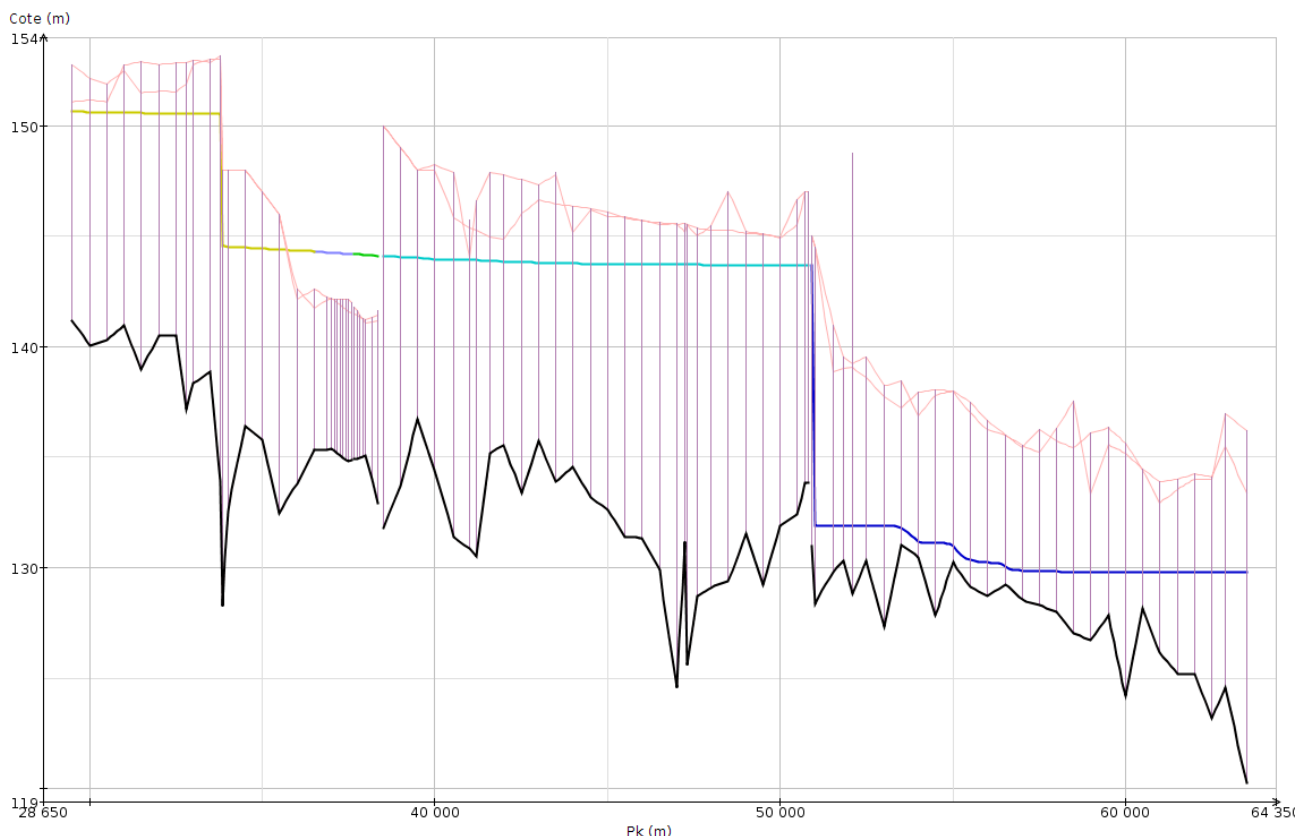


Figure 27: Ligne d'eau de 5 biefs du Rhône obtenue sous PamHyr après calcul par Mage

8.2 COMPARAISON DE LIGNES D'EAU

Pour caler notre modèle (en particulier pour le choix des coefficients de Strickler) et savoir s'il respecte la réalité, nous avons confronté nos résultats de simulations avec des mesures. Ainsi, nous avons comparé des lignes d'eau mesurées à des lignes d'eau calculées avec Mage. Voici un exemple de comparaison (Figure 28).

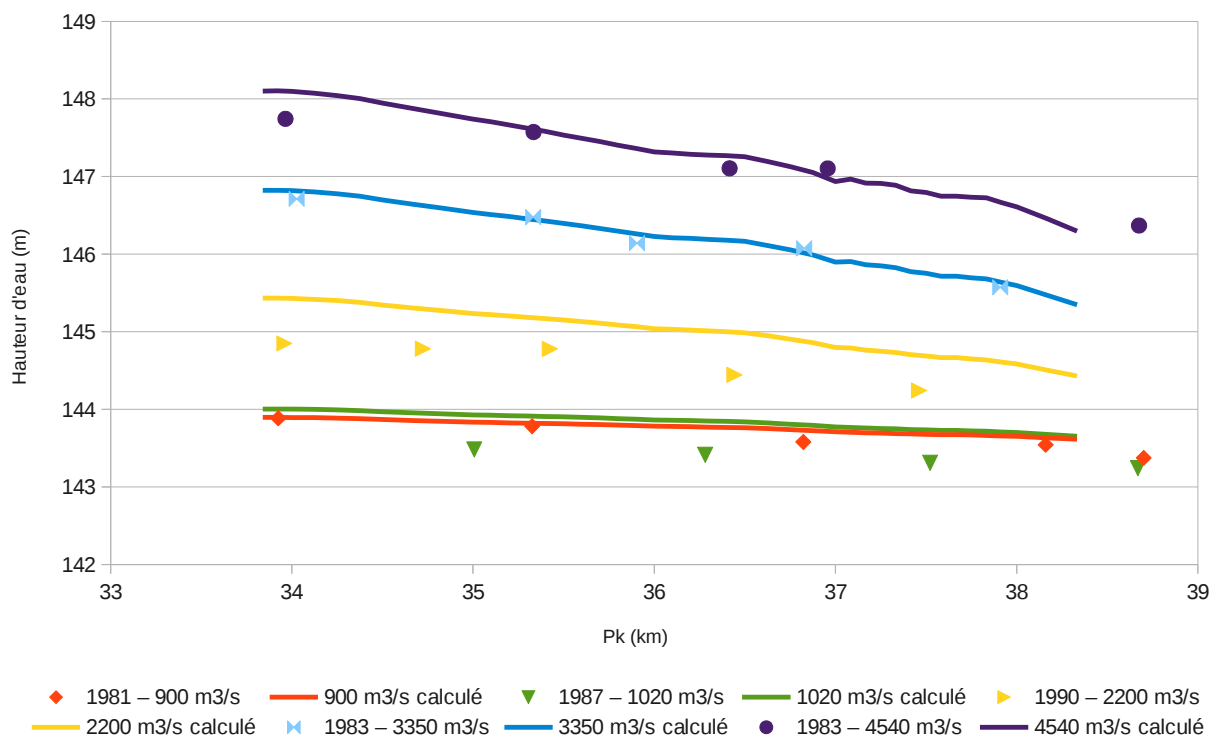


Figure 28: Comparaison de lignes d'eau mesurées et calculées par Mage pour différents débits, sur le Rhône au niveau de la lône du Beurre.

Sachant qu'il faut toujours prendre en compte une marge d'erreur sur les mesures et sur le fait que la gestion des ouvrages n'est pas totalement maîtrisée par le modèle, les résultats sont satisfaisants et l'on voit que le fonctionnement réel est respecté. En effet, on peut remarquer que la ligne d'eau mesurée pour 900 m³/s est plus élevée que celle mesurée pour 1020 m³/s. Ceci peut être expliqué par une gestion différente de la retenue de Saint Pierre de Boeuf.

Ces confrontations n'ont malheureusement pas pu être faites en de nombreux endroits, faute de temps et de données. Par la suite, il reste donc à continuer ce travail pour veiller à ce que le modèle et les mesures soient cohérents.

8.3 HYDROGRAMME : PROPAGATION D'UNE CRUE

Grâce à l'interface PamHyr, il est également possible de tracer des hydrogrammes (débits en fonction du temps). Voici, Figure 29, un graphique représentant la propagation d'une crue du Rhône depuis l'amont du modèle à la frontière Suisse (courbe violette), jusqu'à l'aval avant la confluence avec l'Isère (courbe jaune). Les différentes courbes sont situées :

- courbe violette : à la frontière Suisse,
- courbe jaune : avant la confluence avec l'Ain,
- courbe verte : après la confluence avec l'Ain,
- courbe bleue turquoise : avant la confluence avec la Saône,
- courbe bleue foncée : à l'aval du modèle.

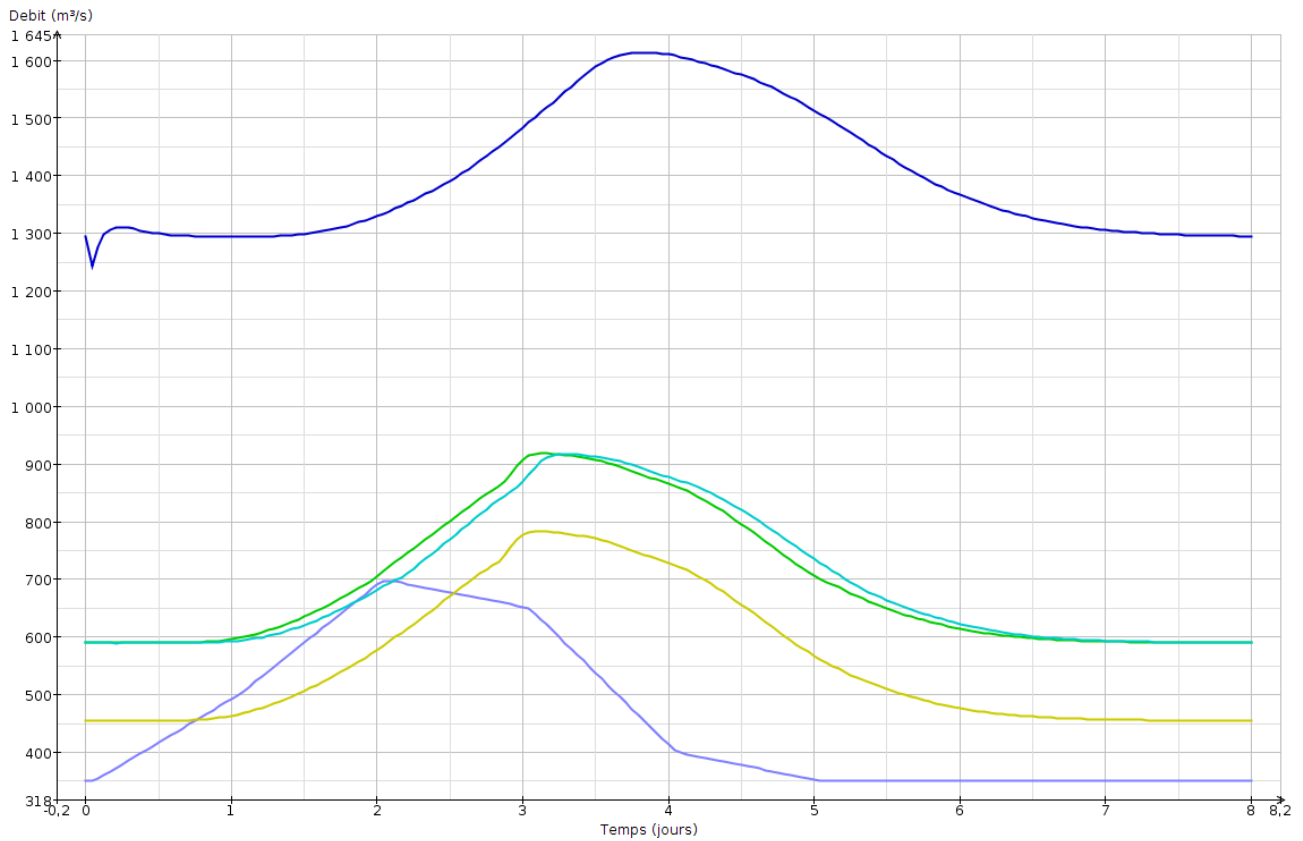


Figure 29: Hydrogrammes issus de PamHy-Mage de la propagation d'une crue.

Sur le même principe que pour les hydrogrammes, il est possible de tracer différents graphiques de résultats après avoir lancé une simulation avec PamHy-Mage, tels que :

- graphique représentant les vitesses,
- limnigramme.

9 MODÉLISATION DU TRANSPORT DE SÉDIMENTS FINS : PARAMÉTRISATION

Dans cette partie, nous décrivons les différents paramètres qui ont servis à la mise en place de la modélisation du transport sédimentaire par le modèle d'advection diffusion Adis-TS.

9.1 PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES

La première étape consiste à décrire les principales caractéristiques des sédiments que l'on veut modéliser, à savoir :

- le type de polluant ou MES,
- le diamètre median (d_{50}),
- la masse volumique (ρ_s),
- et la porosité.

9.1.1 TYPE DE SÉDIMENTS

Le type de polluant ou sédiment est classé en 8 catégories variant de 0 à 7 comme suit :

0. soluté (polluant dissous),
1. particules sphériques,
2. galets lisses,
3. sable naturel,
4. sable concassé,
5. cylindres longs,
6. limons et particules cohésives,
7. floccs.

Ce choix a pour principal impact l'estimation de la vitesse de chute de la particule. Pour notre simulation nous avons choisi les types 6 et 3 selon les différentes classes de sédiments modélisées (voir tableau 11). Les particules les plus fines ($< 50 \mu\text{m}$) sont assimilées à des limons alors que les particules les plus grossières ($\geq 50 \mu\text{m}$) à des sables naturels.

9.1.2 DIAMÈTRE MOYEN

Le diamètre médian, ou d_{50} , est le diamètre caractérisant une classe de sédiments pour laquelle 50 % des particules en masse ont un diamètre supérieur à celui-ci.

Dans notre cas nous avons donc choisi trois diamètres différents : $d_{50} = 8 \mu\text{m}$, $d_{50} = 20 \mu\text{m}$ et $d_{50} = 50 \mu\text{m}$ Voir paragraphe 6.3.1.

9.1.3 MASSE VOLUMIQUE

La masse volumique ρ_s est déterminée par le rapport m/V où m est la masse de la substance homogène occupant un volume V .

La masse volumique ρ_s est de 2650 kg/m^3 pour les trois classes de sédiments représentées. Cette valeur correspond à la masse volumique de la silice SiO_2 , composant largement prédominant des matériaux inorganiques en rivière. Les flux de matières organiques (carbone, azote...) ne sont pas considérés dans cette étude.

9.1.4 POROSITÉ

La porosité est l'ensemble des interstices (connectés ou non) d'une roche ou d'un autre matériau pouvant contenir des fluides (liquide ou gaz). La porosité est également la valeur numérique qui caractérise ces interstices, c'est à dire le rapport du volume des vides du matériau divisé par le volume total. La valeur de la porosité d'un mélange de sédiments se situe entre 0,1 (matériau très compacté) et 0,6 (matériau très lâche). Ce choix impacte uniquement sur l'estimation de l'épaisseur des dépôts à partir des masses déposées calculées. Dans notre cas, la porosité a donc été prise arbitrairement à 0,5.

Voici un tableau récapitulatif des caractéristiques décrites ci-dessus :

Tableau 11: Caractéristiques des sédiments du Rhône à Jons utilisés pour la modélisation.

Diamètre	Pourcentage	Type de sédiments	Porosité	Masse volumique
8 µm,	65%	limons et particules cohésives (6)	0.5	2650 g/l
20 µm,	25%	limons et particules cohésives (6)	0.5	2650 g/l
50 µm	10%	Sable naturel (3)	0.5	2650 g/l

9.2 COEFFICIENT CINÉTIQUE DE DISPARITION DU SOLUTÉ

Le coefficient de disparition cinétique d'un élément (a priori un soluté) permet de prendre en compte une possible disparition de cette élément du fait d'une dégradation ou transformation physico-chimique. Il est défini par deux valeurs : une pour le cas de la rivière et l'autre pour le cas d'un casier :

- cdc_{riv} : coefficient de disparition cinétique du soluté en rivière
- cdc_{cas} : coefficient de disparition cinétique du soluté en casier

Dans notre cas, comme nous travaillons avec des sédiments fins non réactifs, nous avons donc pris $cdc_{riv} = 0$ et $cdc_{cas} = 0$.

9.3 COEFFICIENTS DE DIFFUSION

Comme indiqué au paragraphe 5.2.3, il est possible d'utiliser quatre méthodes différentes d'évaluation des coefficients de diffusion dans Adis-TS. Nous avons utilisé différentes méthodes selon les biefs :

- Canal de Miribel : méthode constante, coefficient fixé à 15 (voir Andries et al., 2012 ; Launay et al., 2012).
- Canal de Jonage et Vieux-Rhône : méthode constante, coefficient fixé à 10 (voir Andries et al., 2012 ; Launay et al., 2012).
- Bief 46 : méthode de Fischer (avec la valeur par défaut) car la particularité de ce bief 46 est qu'il présente une grande variation de largeur à l'endroit où la concentration s'effondre. Pour de telles caractéristiques, c'est la formule de Fisher qui est la plus adaptée (Simon, 1995).

- Pour le reste nous avons utilisé par défaut la méthode de Elder avec le coefficient par défaut 100.

9.4 *CONDITIONS AUX LIMITES ET CONDITIONS INITIALES*

9.4.1 *CONDITIONS AUX LIMITES ET APPORTS PONCTUELS*

Il s'agit des conditions aux limites amont qui définissent les apports de masse dans le modèle. Ces conditions ne s'appliquent que si le débit est entrant. Dans le cas des nœuds amont du modèle, il faut fournir une concentration en fonction du temps. On peut aussi définir des apports dans les nœuds intermédiaires. Dans ce cas il s'agit d'un débit massique fonction du temps. Donc :

- si le nœud est un nœud amont (une entrée du modèle) : concentration en fonction du temps (unité : kg/m^3 ou g/L),
- si le nœud est interne (non aval) : débit massique en kg/s ,
- pour chaque nœud où aucune loi n'est fournie, l'apport est nul.

Les conditions aux limites aval (sorties) sont des conditions de type Neumann homogènes et donc ne requièrent aucune donnée.

9.4.2 *CONDITIONS INITIALES*

Les conditions initiales définissent l'état initial pour chaque classe de sédiment. L'état initial comprend la concentration en tout point du réseau et les masses déposées au fond

- dans le lit mineur,
- dans le lit majeur gauche,
- et dans le lit majeur droit.

La définition des conditions initiales est faite à deux niveaux :

- définition de valeurs par défaut globales,
- définition des valeurs pour certains tronçons par surcharge des valeurs par défaut.

On définit chaque fois 4 valeurs :

- une concentration en g/L ,
- 3 épaisseurs de sédiment déposées au fond, en lit majeur gauche, lit mineur et lit majeur droit.

Les épaisseurs sont indiquées en mètre(s).

10 SIMULATIONS ET RÉSULTATS HYDRO-SÉDIMENTAIRES

Nous avons effectué plusieurs simulations hydro-sédimentaires pour illustrer les applications possibles du modèle du Rhône et du suivi de pollutions et de MES sur celui-ci.

10.1 SIMULATION 1 : ÉTAT DE RÉFÉRENCE, APPORTS CONSTANTS EN DÉBIT ET EN MES

Pour cette première simulation, nous avons voulu représenter le fonctionnement « classique » du Rhône :

- débits moyens (modules) du Rhône et de ses affluents,
- concentration en MES pour la Saône et le Rhône,
- et concentration supposée négligeable (donc nulle) pour l'Ain et les autres affluents.

Nous avons utilisé des débits et des concentrations constantes dans le temps. Les concentrations du Rhône et de la Saône sont telles que déterminées au paragraphe 6.3.2 .

Nous avons considéré le dépôt initial ainsi que la concentration initiale nuls. On détaille ci dessous les valeurs des apports liquides et solides.

10.1.1 APPORTS EN EAU ET EN MES

- Débit du Rhône à Chancy-Pougny : 350 m³/s.
- Débit de l'Ain : 120 m³/s.
- Débit de la Saône : 475 m³/s.
- Autres débits : débits du tableau 7, constants.
- Concentration en MES du Rhône à Chancy-Pougny :
$$C_{Rhône} = 2.10^{-9} Q_{Rhône}^{2,5} = 2.10^{-9} * 350^{2,5} = 0,00458 \text{ g/L} .$$
- Concentration en MES de la Saône :
$$C_{Saône} = 3.10^{-5} Q_{Saône}^{1,1} = 3.10^{-5} * 475^{1,1} = 0,02639 \text{ g/L} .$$
- Aucune autre concentration en MES.
- Granulométrie : pour les deux affluents on utilise les trois diamètres 8, 20 et 50 µm définis au paragraphe 6.3.1 : $M_{dépôt} = 0,65 M_{dépôt 8 \mu m} + 0,25 M_{dépôt 20 \mu m} + 0,10 M_{dépôt 50 \mu m} .$

10.1.2 RÉSULTATS

On peut voir sur le graphique (Figure 30) les masses déposées et leurs lieux de dépôt sur tout le linéaire du Rhône, suite à la simulation 1. La Figure 30b représente uniquement les biefs (avec leur nom) où l'on observe un dépôt.

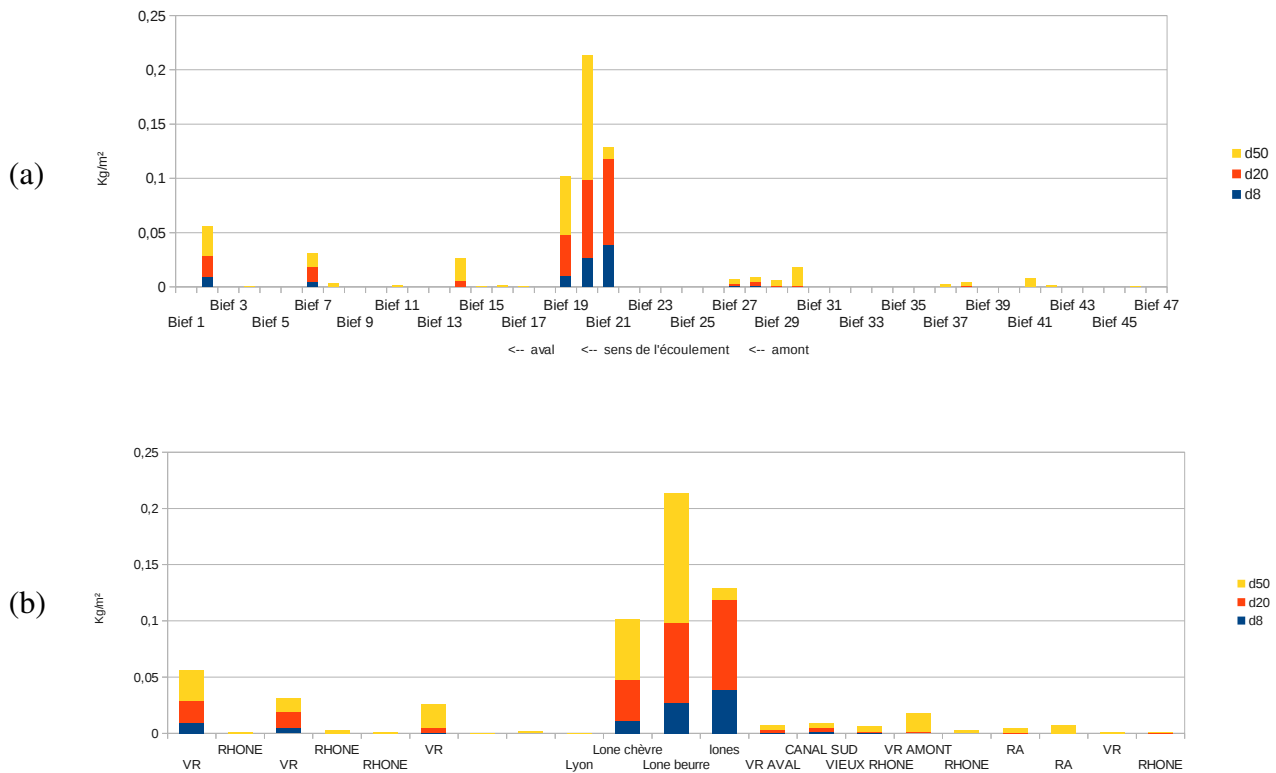


Figure 30: Masses de sédiments déposées en kg/m² pour la simulation 1 sur tout le linéaire du Rhône modélisé (a) et sur les biefs où l'on observe des masses de sédiments déposées (b).

On observe qu'il n'y a pas de dépôt sur l'ensemble de linéaire du Rhône (dépôt sur 21 biefs sur 47).

Si on exclue la zone de Miribel-Jonage du Rhône amont, on observe peu de dépôt sur le Rhône amont et, lorsqu'il y a dépôt, celui-ci se compose quasi exclusivement de sédiments de diamètre 50 µm.

On remarque trois zones de dépôts importants :

- la zone de Miribel Jonage (biefs 27 à 30),
- la zone de la lône du Beurre (biefs 19, 20, 21),
- ainsi que trois biefs isolés à l'aval qui sont trois « Vieux-Rhône » composant les aménagements hydrauliques types du Rhône¹.

Zone de Miribel Jonage :

Les trois diamètres de sédiments se déposent mais la grande majorité du dépôt est constituée de sédiments de diamètre 50 et 20 µm. Les sédiments de diamètre 8 µm ne représentent d'une minorité du dépôt. On retrouve ses sédiments de diamètre 8 µm uniquement dans les biefs du Canal Sud et du Vieux-Rhône aval.

¹ Voir les explications sur les « aménagements types » à la Figure 26.

Zone des lônes du beurre et de la chèvre :

Elle est de loin la zone où le dépôt par unité de surface est le plus fort. Les dépôts dans la lône du beurre sont composés en majorité de sédiments de diamètre 20 μm , puis vient le diamètre 50 μm et enfin le diamètre 8 μm qui est minoritaire bien qu'il soit présent dans une proportion beaucoup plus importante que dans les dépôts situés en amont des lônes.

Il est à noter qu'il y a d'autres zones pouvant avoir un comportement similaire (lônes actives) qui ne sont pas modélisées dans le modèle actuel. Ces zones pourront aisément être intégrées au modèle dans le futur afin d'améliorer les résultats du modèle. Il apparaît en effet que les bras secondaires (lônes actives en particulier) jouent un rôle très important dans la dynamique des MES.

Tronçons du « Vieux-Rhône » :

En ce qui concerne les trois aménagements les plus à l'aval de notre modèle, on retrouve dans les Vieux-Rhône un dépôt plus similaire à celui de la lône qu'à ceux du Rhône amont, avec un dépôt de sédiments fins (8 μm) non négligeable. Pour ces trois derniers aménagements les débits réservés dans les Vieux-Rhône sont nettement plus faibles que pour les aménagements amont (une dizaine de m^3/s contre une centaine, voir tableau 10) ce qui peut expliquer pourquoi le dépôt y soit plus fort.

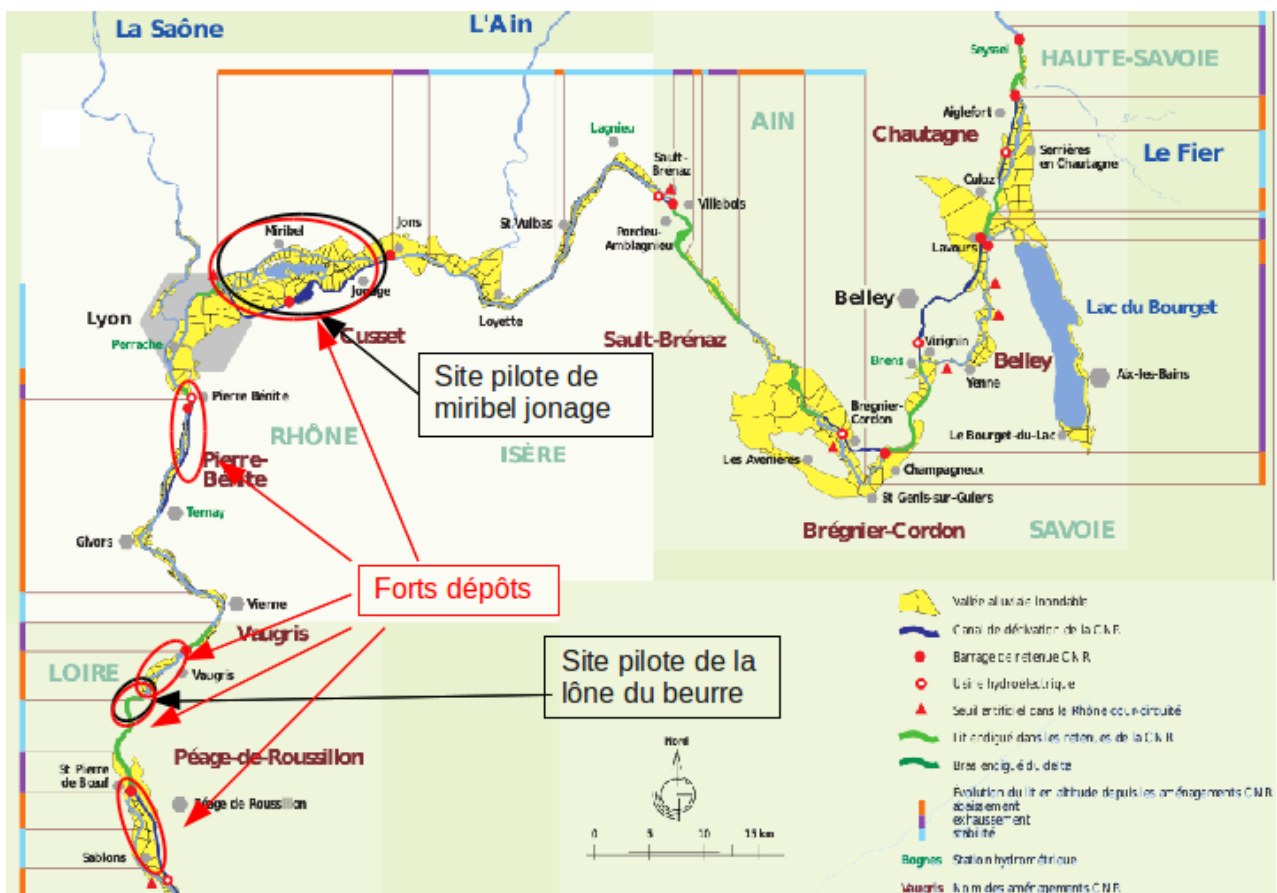


Figure 31: Carte représentant les zones où l'on retrouve les forts dépôts

Ainsi, par l'intermédiaire du modèle et des logiciels d'hydraulique (Mage) et de transport de sédiments (Adis-TS), on peut déterminer les lieux de dépôts de sédiments classiques et estimer les

masses déposées. Ainsi, si des sédiments pollués au PCB sont détectés, il est possible de savoir où l'on risque de les retrouver.

10.2 SIMULATION 2 : POLLUTION SUR UN AFFLUENT ET DIFFUSION

On simule cette fois une pollution sur un affluent qui viendrait contaminer le Rhône. Pour mieux voir l'effet sur le Rhône, la Saône et le Rhône ont une concentration en MES nulle (et donc une pollution nulle puisque celle-ci se fixe sur les sédiments). Tous les débits sont constants à leur valeur moyenne.

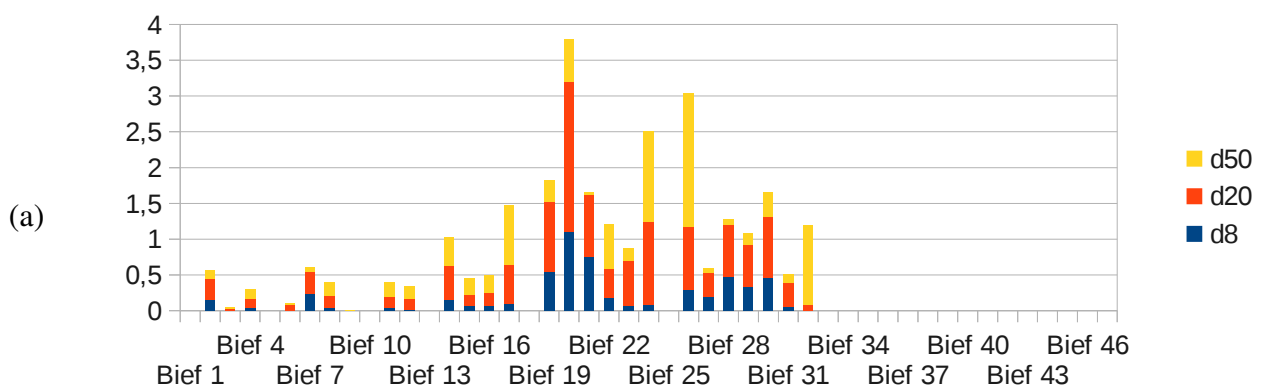
Nous avons choisi comme affluent contaminé l'Ain.

10.2.1 APPORTS DU RHÔNE EN EAU ET EN MES

- Débit du Rhône à Chancy-Pougny : 350 m³/s.
- Débit de l'Ain : 120 m³/s.
- Débit de la Saône : 475 m³/s.
- Autres débits : débits du tableau 7, constants.
- Concentrations en MES du Rhône à Chancy-Pougny et de la Saône : nulles.
- Autres concentrations en MES : sur l'Ain, fixée à 2g/L.
- Granulométrie : pour les deux affluents on utilise les trois diamètres 8, 20 et 50 µm définis au paragraphe 6.3.1 : $M_{\text{dépôt}} = 0,65 M_{\text{dépôt } 8 \mu\text{m}} + 0,25 M_{\text{dépôt } 20 \mu\text{m}} + 0,10 M_{\text{dépôt } 50 \mu\text{m}}$.

10.2.2 RÉSULTATS

Cette simulation permet de regarder comment se comporte dans le Rhône un polluant arrivant d'un affluent. L'Ain étant l'affluent pollué, la pollution n'apparaît dans le Rhône qu'après sa confluence avec le Rhône, soit sur les deux derniers tiers du modèle, comme on peut le voir sur le Figure 32.



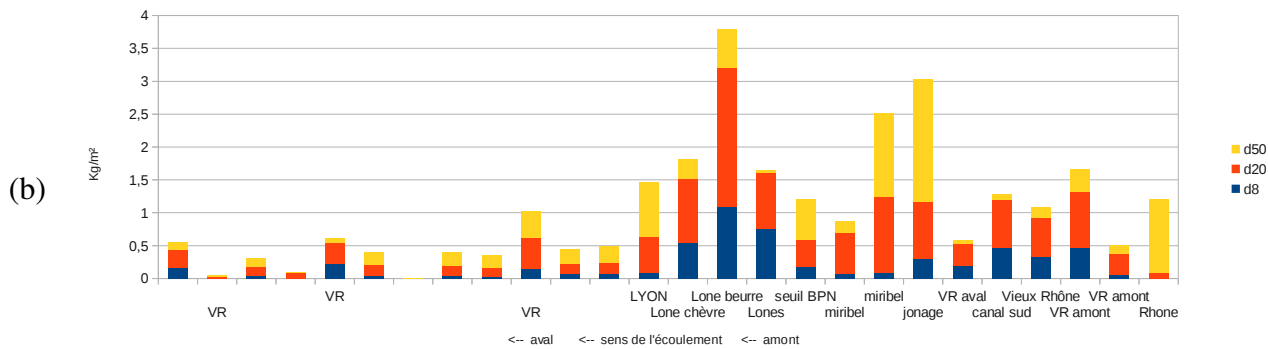


Figure 32: Masses de sédiments déposées en kg/m^2 pour la simulation 2 sur tout le linéaire du Rhône modélisé (a) et sur les biefs où l'on observe des masses de sédiments déposées (b).

Voici les principaux points que l'on peut relever à partir de la Figure 32:

- La première chose que l'on peut noter c'est qu'il n'y a pas de dépôt dans l'Ain lui même (bief 34).
- Les dépôts sont répartis sur l'ensemble des biefs. La proportion des sédiments de diamètre $50 \mu\text{m}$ diminue plus on s'éloigne de la source (l'Ain), ce qui est logique puisque plus le sédiment est lourd plus il va avoir tendance à se déposer vite.
- On observe seulement 5 biefs sans pollution (à l'aval de la confluence avec l'Ain) : seul un Rhône aménagé n'est pas pollué (entre Pierre Bénite et Ternay), le « Canal de Jonage Aval » dans la zone de Miribel-Jonage, ainsi que trois tronçons du Rhône (le tronçon du Rhône parallèle à la lône de la chèvre, et les tronçons du Rhône à l'aval immédiat des deux derniers aménagements hydrauliques modélisés).
- Plus on est proche de l'Ain, plus il y a de dépôts de sédiments. Par contre on retrouve toujours les mêmes zones plus fortement touchées par les dépôts : Miribel Jonage et les lônes, ainsi que les trois derniers Vieux-Rhône.

10.3 SIMULATION 3 : CHASSE DE 2003

Pour permettre de caler notre modèle et de le vérifier, nous avons simulé cette fois la chasse du Rhône de 2003 en partant des données en notre possession. Nous avons récupéré des mesures réalisées en 2003 par la CNR (CNR, 2003) qui nous permettent d'avoir les concentrations en MES et les débits à l'amont du modèle. Puis nous avons, entre autre, comparé les résultats obtenus par les calculs au niveau de la zone de Miribel Jonage avec les mesures qui y avaient été effectuées en 2003 par Burgeap (2011).

Cependant, nous avons réalisé notre simulation avec des barrages fonctionnant en débit normal et non en crue (mise en transparence du barrage) comme ça devrait être le cas lors d'une chasse, même si le débit est inférieur aux consignes d'exploitations (cf. paragraphe 4.2 sur les consignes d'exploitations des barrages en cas de crue). Il serait possible de réaliser un modèle spécifique en mettant tous les barrages en transparence mais nous n'avons pas encore de solutions permettant de passer d'un système à un autre pour faire une modélisation sur le long terme.

10.3.1 APPORTS DU RHÔNE EN EAU ET EN MES

- Débit et concentration du Rhône à Pougny

Nous nous sommes basés sur les données mesurées à Chancy Pougny lors de la chasse de 2003.

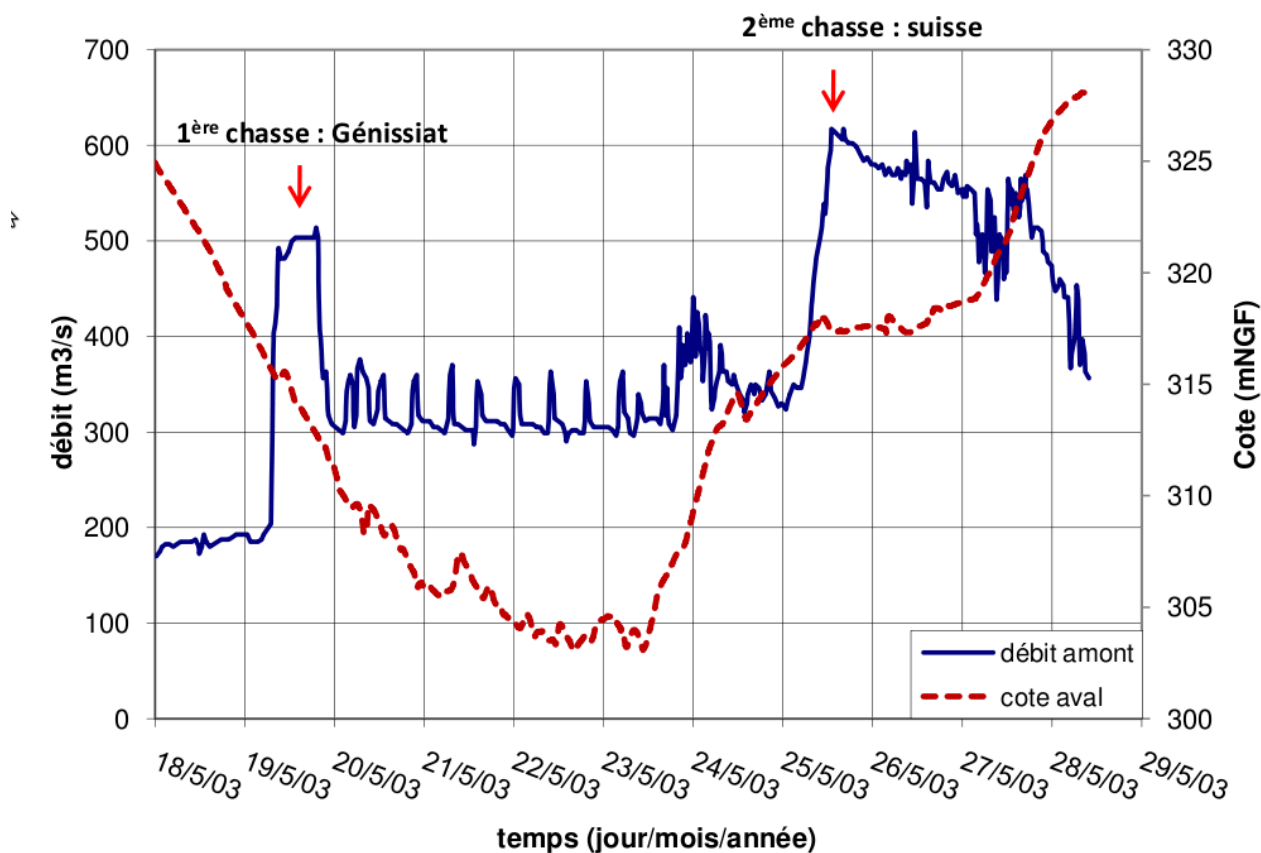


Figure 33: Débits mesurés à Chancy Pougny pendant la chasse de mai 2003 (la cote correspond à une mesure dans la retenue au barrage de Génissiat).

- Débit de l'Ain : 120 m³/s.
- Débit de la Saône : 475 m³/s.
- Autres débits : débits constants (voir tableau 7).
- Concentrations en MES du Rhône à Pougny :

Pour la concentration en MES, nous nous sommes également basés sur les relevés effectués durant la chasse. La chasse fonctionne donc en deux étapes qui créent deux pics de MES :

- Première étape : chasse du barrage de Génissiat et création d'un premier pic de concentration de MES.
- Deuxième étape : chasse des barrages suisses (Chèvres, Verbois) et deuxième pic de concentration de MES. La cote dans le barrage de Génissiat est relevée pour faire sédimenter une grande partie des sédiments dans la retenue et ainsi atténuer le pic de concentration.

Pour représenter ces deux étapes de la chasse, nous nous sommes basés sur les relevés de concentration en MES à Pougny (pic de MES correspondant à la chasse des barrages suisses, Figure 34(a)) et à Seyssel (pics de MES correspondant à l'ensemble de la chasse, Figure 34(b)). Il est ainsi possible de retrouver le pic de MES correspondant à la chasse des barrages suisses sur les deux graphiques. Un décalage d'environ 6 heures est ainsi observé entre Pougny et Seyssel avec une réduction du pic de concentration d'environ 30 %.

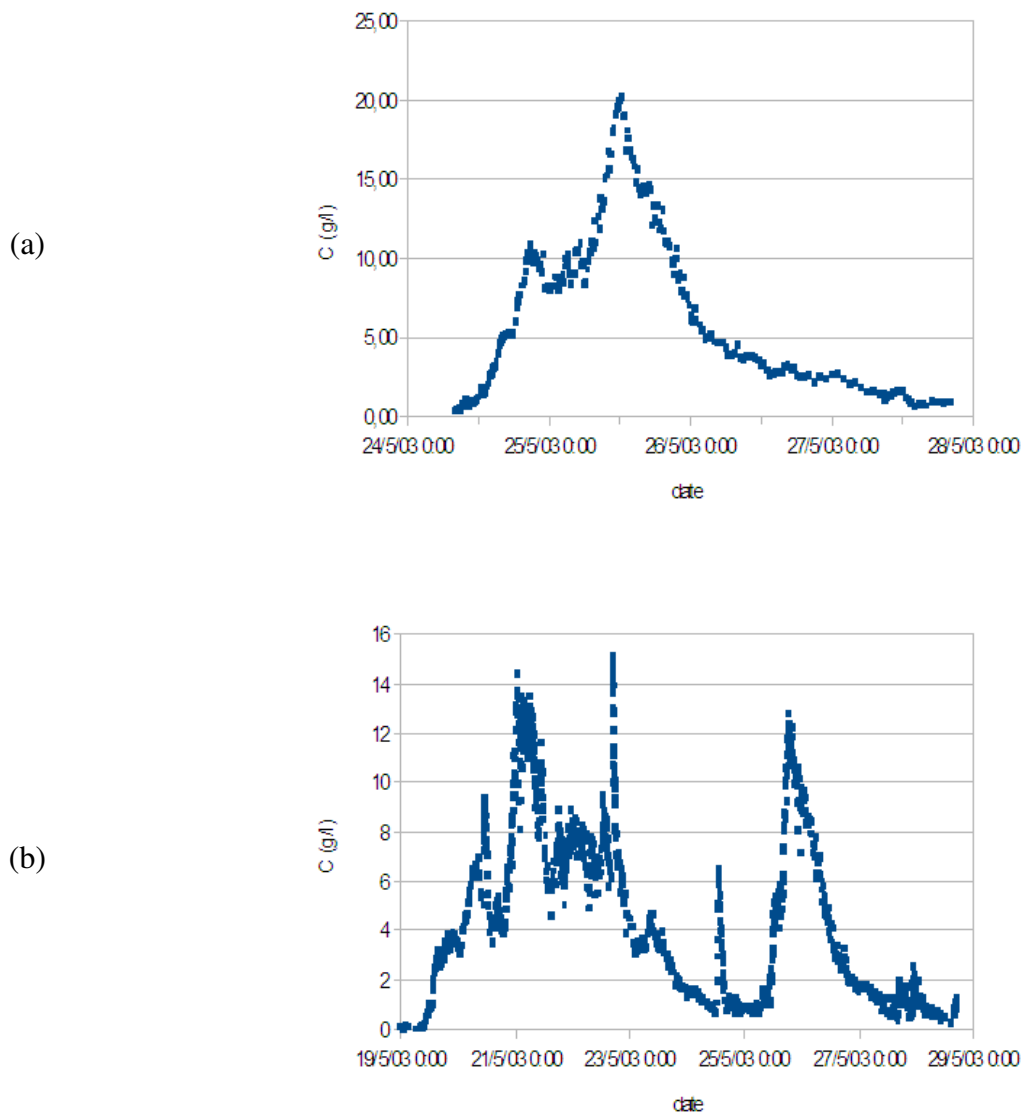


Figure 34: Concentrations mesurées à Pougny (a) et à Seyssel (b) lors de la chasse de 2003.

Comme nous ne pouvons entrer une concentration en MES en fonction du temps qu'à un nœud amont du modèle et non à un nœud intermédiaire (cf. paragraphe 9.4.1), il n'est pas possible de représenter la chasse telle qu'elle se déroule avec une concentration à Pougny et une concentration à l'aval de Génissiat. Afin de simuler un signal de MES qui soit en cohérence avec les observations en aval du barrage de Génissiat, nous avons créé une chronique fictive simplifiée pour les données de concentrations et débits à Pougny, qui regroupe les deux pics de la chasse. On obtient ainsi la

condition limite amont sur la Figure 35. La granulométrie des sédiments introduits est supposée la même que celle observée à l'aval. On utilise ainsi les trois diamètres 8, 20 et 50 μm définis au paragraphe 6.3.1 : $M_{\text{dépôt}} = 0,65 M_{\text{dépôt } 8 \mu\text{m}} + 0,25 M_{\text{dépôt } 20 \mu\text{m}} + 0,10 M_{\text{dépôt } 50 \mu\text{m}}$.

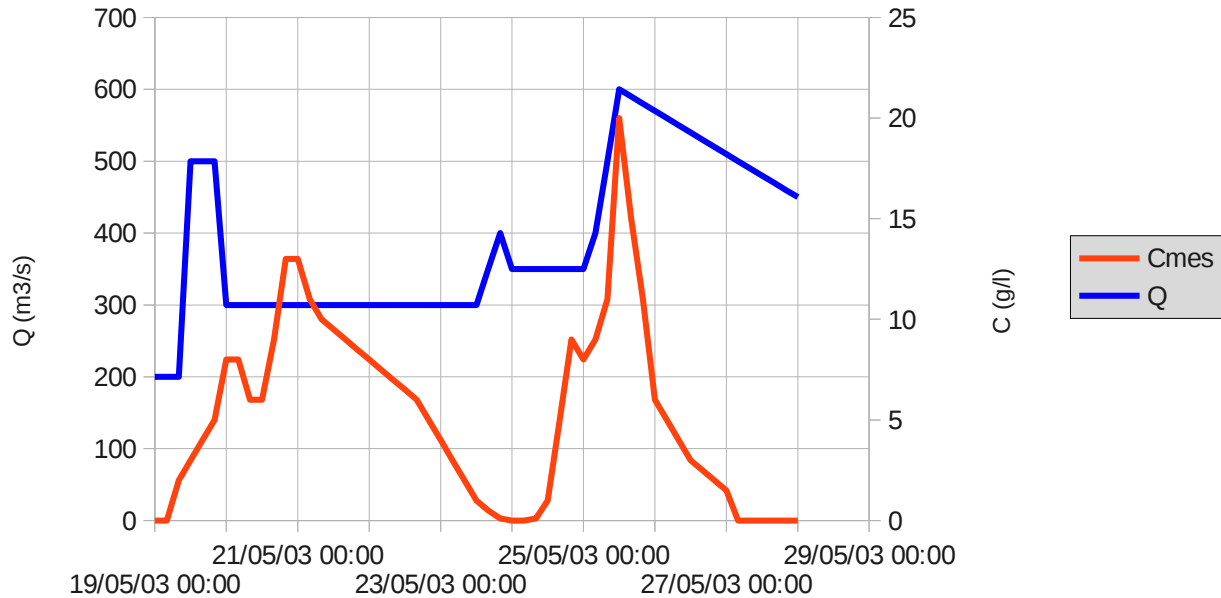


Figure 35: Concentration en MES et débit utilisés pour la simulation de la chasse à la limite amont du modèle.

Il est à noter que le modèle inclus le barrage de Chancy-Pougny (début à la frontière suisse) alors que ces conditions aux limites sont basées sur des mesures à Pougny, soit en aval de ce dernier barrage.

10.3.2 PREMIERS RÉSULTATS ET CALAGE

Nous avons réalisé une série de trois simulations tests à partir du jeu de données de la chasse de 2003 pour essayer d'affiner les résultats du modèle et de caler les paramètres, notamment :

- les coefficients de la loi de dépôt-érosion : a_{pd} (cf. paragraphe 5.2.2),
- et de la loi pour la concentration à l'équilibre (homogène à une concentration) : a_c (cf. paragraphe 5.2.2).

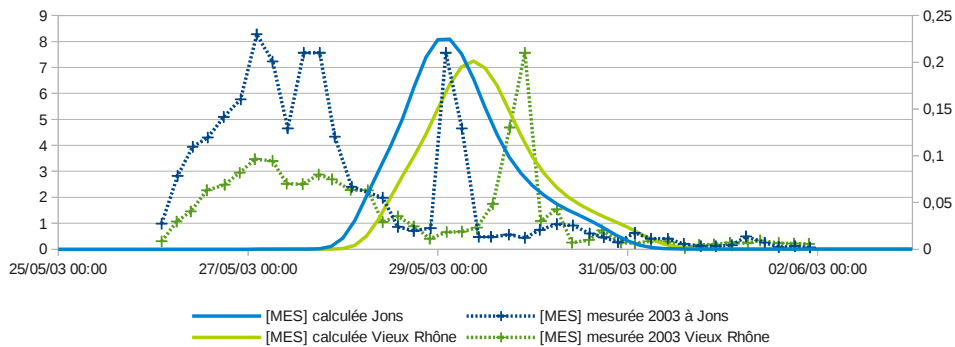
Nous avons donc comparé les résultats obtenus à Miribel Jonage entre le modèle et les mesures, puis à Seyssel, également entre le modèle et les mesures.

- Variation du paramètre a_c et influence sur la concentration

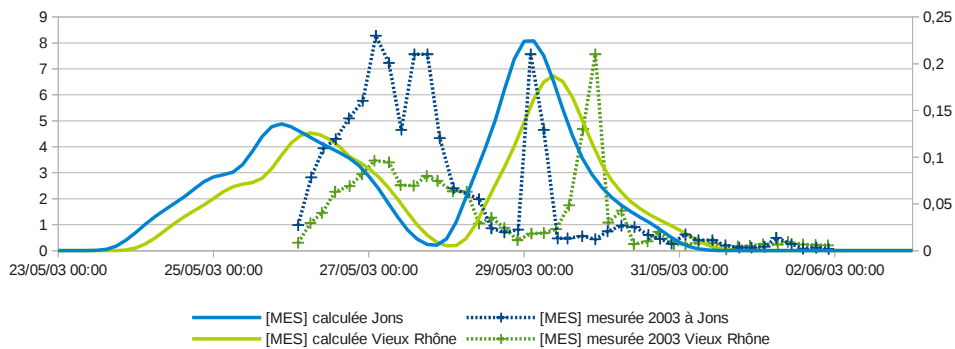
Nous avons traité deux cas $a_c = 0,001$ et $a_c = 0,0005$. Dans le premier cas ($a_c = 0,001$) nous n'avons simulé que le deuxième pic de la chasse (correspondant à la chasse des barrages suisses), la comparaison se fait donc uniquement sur ce deuxième pic de MES. Il apparaît (de manière un peu surprenante du fait de la mauvaise prise en compte de la transparence des barrages) que la simulation du temps de propagation est assez cohérente avec les mesures à Miribel.

De plus, on voit Figure 36 (a) et (b) que la modification du paramètre a_c n'a pas influencé sur la concentration calculée à Miribel Jonage, celle-ci restant beaucoup trop importante par rapport aux

mesures (environ 30 fois supérieure) : la concentration mesurée atteint son maximum à Jons à 0,25 g/l environ quand la concentration calculée est d'un peu plus de 8 g/l (8,2 g/l).



(a) : $a_c = 0,001$



(b) : $a_c = 0,0005$

Figure 36: Comparaison entre la concentration en MES mesurée et calculée à Miribel Jonage pour deux valeurs du coefficient a_c différentes sur la chasse de 2003.

- Variation du paramètre a_{pd} et influence sur la concentration

Toujours pour pallier à cette concentration trop importante, nous avons fait varier le coefficient a_{pd} (coefficient de la loi de dépôt-érosion). Nous avons fait deux tests : l'un pour $a_{pd} = 0,1$ et l'autre pour $a_{pd} = 0,2$ (dans les deux cas nous avons pris $a_c = 0,0005$).

On voit Figure 37 (a) et (b) que la modification de a_{pd} a permis une légère diminution de la concentration calculée à Jons :

- 7,28 g/l pour $a_{pd} = 0,1$,
- contre 8,06 g/l pour $a_{pd} = 0,2$.

La diminution est très faible par rapport au résultat à obtenir mais permet de voir l'impact des différents coefficients sur le calcul.

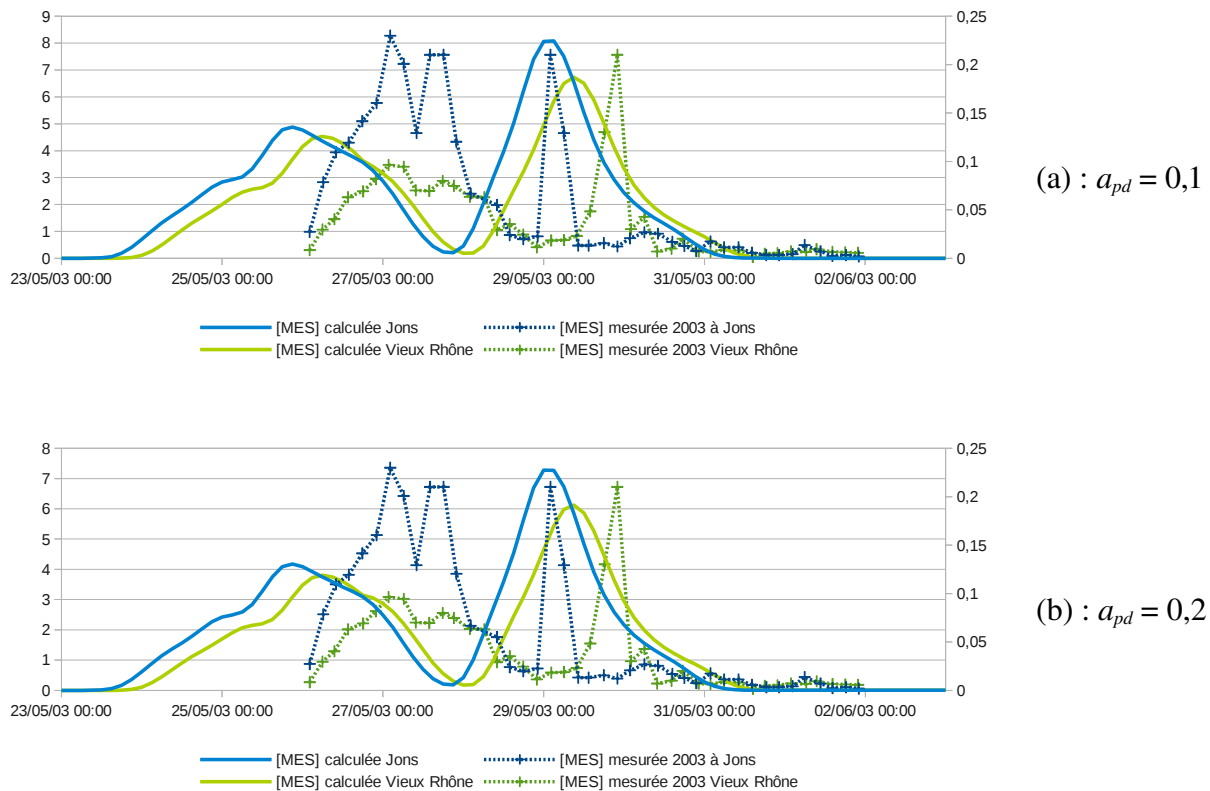


Figure 37: Comparaison entre la concentration en MES mesurée et calculée à Miribel Jonage pour deux valeurs du coefficient a_{pd} différentes sur la chasse de 2003.

Nous avons également comparé les résultats au niveau du barrage de Seyssel, en Figure 38. On voit donc qu'à Seyssel, à moins de 40 km du barrage de Chancy-Pougny, point amont du modèle, le pic de concentration est de 14,70 g/l (pour $a_{pd} = 0,1$, le pic de concentration est de 16,09 g/l) au lieu des 13 g/l mesuré. Grâce aux résultats obtenus avec ce petit test de sensibilité sur les deux coefficients de la loi de dépôt-érosion et de la loi pour la concentration à l'équilibre, nous voyons que les lois de dépôts et érosions utilisées dans Adis-Ts doivent encore être améliorées.

Mais les résultats présentés permettent également de caractériser d'autres points sur notre modélisation du transport sédimentaire du Rhône, comme la propagation des MES. A Seyssel, la concentration calculée à un retard de 18 heures sur le pic mesurée, après seulement 40 km de simulation. Par contre à Jons, le premier pic de MES correspondant à la chasse de Génissiat semble avoir de l'avance, tandis que le deuxième pic de MES calculé et celui mesuré correspondent parfaitement dans le temps (cf. Figure 37).

Ces résultats mettent donc en apparence une question complexe sur la vitesse de propagation des MES dans le modèle. En effet, le retard accumulé au bout des 40 premiers km est repris au bout de 160 km. Le retard accumulé sur les 40 premiers km peut s'expliquer par la présence de trois barrages-usines (Chancy Pougny, Génissiat et Seyssel) qui sont modélisés vannes fermées, ce qui crée de gros ralentissements des vitesses dans la retenue par rapport à la chasse. Par contre la on suppose qu'il y a surestimation de la vitesse de propagation sur les reste du modèle pour avoir un signal à Miribel Jonage dans des temps similaires aux concentrations mesurées.

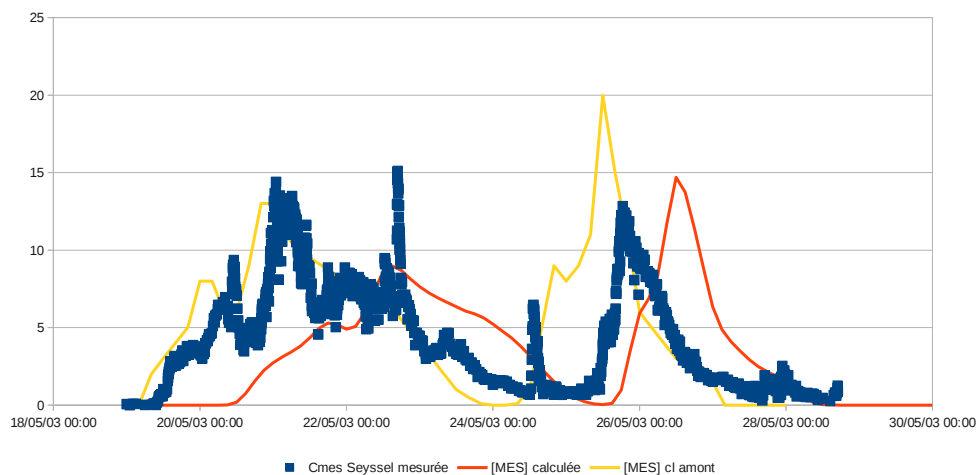


Figure 38: Comparaison entre la concentration en MES mesurée et calculée à Seyssel pour la chasse de 2003 ($a_{pd} = 0,2$ et $a_c = 0,0005$).

Plusieurs hypothèses sont possibles, notamment le fait que les coefficients de Strickler utilisés puissent être mal calés et permettent un écoulement plus rapide, ce qui compenserait le retard pris dans les retenues des barrages-usines.

Toutefois il faut préciser que certaines interrogations, voire doutes sur les mesures récupérées à Miribel Jonage peuvent être émis. En effet, nous ne connaissons pas la source exacte de ces données (Burgeap, 2011) et les mesures soulèvent les doutes suivants :

- Comment se fait-il que les deux pics de concentrations mesurés à Jons soit d'aussi forte intensité alors que les mesures à l'amont indiquent un pic issu de la chasse de Génissiat plus faible et décroissant plus vite (du fait d'une granulométrie plus élevée) que celui de la chasse des barrages suisses (CNR 2003) ?
- Et comment se fait-il que ce ne soit pas le cas pour le Vieux-Rhône où les deux pics sont d'intensités différentes et plus cohérent avec ce qu'on attendait ?
- Ou bien est-ce que ce premier pic de MES à Jons serait dû à une crue qui aurait eu lieu sur un affluent apportant une concentration plus importante en MES ? Mais dans ce cas là pourquoi le comportement n'est pas le même dans le Vieux-Rhône où le premier pic de MES est beaucoup moins fort que le deuxième ?
- De plus, il semblerait que des mesures avant et après la zone de Miribel Jonage ne relèvent pas aussi nettement le premiers pic de MES issu de Génissiat (CNR 2003).

Face au manque d'informations autour de ces mesures, toutes ces questions et interrogations laissent planer le doute sur la qualité de ces mesures et ne permettent pas de tirer de conclusions certaines sur la comparaison entre modèle et mesures à Miribel-Jonage. Les mesures récentes effectuées lors de la chasse de 2012 seront donc très utiles pour permettre le calage du modèle et un travail plus sûr sur les résultats.

10.3.3 RÉSULTATS, DÉPÔTS ET CONCENTRATIONS

Voici présentés ci dessous les résultats obtenus pour la simulation de la chasse du Rhône de 2003, (avec comme coefficients utilisés $a_c = 0,0005$ et $a_{pd} = 0,2$). Nous avons tout d'abord observé les masses déposées, leur lieu de dépôt et leur caractéristiques.

- Masses déposées

On observe, Figure 39, que le dépôt est très important à l'amont puis diminue petit à petit jusqu'à l'aval. Voici les principaux résultats observés :

- la majeure partie des sédiments de diamètre 50 μm dépose sur les premiers biefs à l'amont (40 km environ) et la quasi totalité sur les 120 premiers km,
- on retrouve toujours un dépôt un peu plus important sur les zones de dépôt « classiques » (voir au 10.1.2 les résultats de la simulation 1) : Miribel Jonage et les lônes.

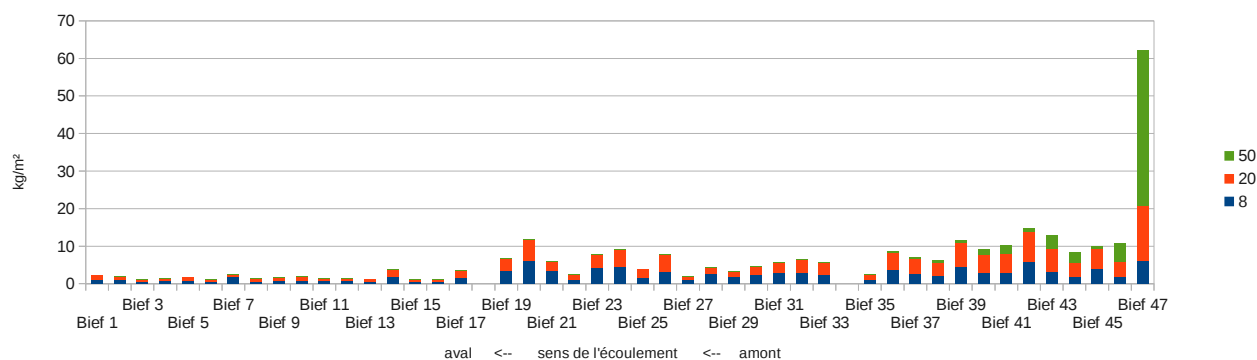


Figure 39: Masses de sédiments déposées en kg/m^2 sur tout le linéaire du Rhône modélisé, simulation 3.

Ce graphique illustre bien les limites de notre modèle qui fonctionne avec des barrages aux vannes fermées. On voit que sur le premier bief comportant le barrage de Chancy-Pougny, la quasi totalité des sédiments de diamètre 50 se déposent mais aussi une proportion importante de sédiments de diamètre 20 et 8. En effet, avec les vannes des barrages fermées, la vitesse dans les retenues est faible et favorise le dépôt de sédiments. On voit donc l'impact que joue les ouvrages « fermés » sur le transport de sédiments et qui faussent la représentation de la chasse.

Nous avons ensuite cherché à connaître la proportion des sédiments et l'évolution de la concentration en MES tout au long du Rhône.

- Propagation le long du Rhône de la concentration

Étudier l'évolution de la concentration en MES est intéressant tant du point de vue qualitatif pour aider dans l'établissement du suivi des sédiments (connaître le temps d'arrivée du pic de sédiment), que du point de vue quantitatif pour connaître l'intensité de la concentration et avoir une estimation des masses déposées.

On peut voir sur la Figure 40 cette propagation en différents points spécifiques du Rhône :

- aux extrémités aval et amont du modèle,

- après les principaux affluents (l'Ain et la Saône),
- à l'amont et à l'aval de la zone de Miribel Jonage qui est une ancienne zone de divagation du Rhône et donc un lieu qui devrait être propice à l'écrêtement des crues et au dépôt de sédiments (dû aux faibles vitesses).

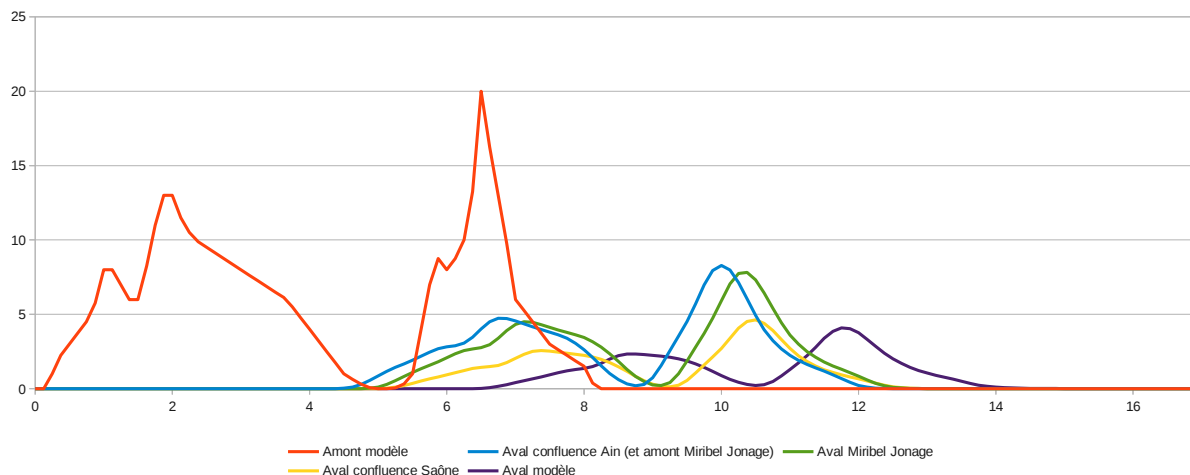


Figure 40: Propagation du pic de MES de l'amont (Suisse) à l'aval (confluence avec Isère) du Rhône.

Le premier pic de concentration qui a lieu au bout de deux jours à l'amont du modèle (courbe orange), arrive au bout de 9 jours environ au niveau de la confluence avec l'Isère (courbe violette). Le deuxième qui a lieu au bout de 6,5 jours à l'amont du modèle arrive quant à lui un peu avant 12 jours à l'aval du modèle. Les pics de MES mettent donc un peu moins de 7 jours à transiter sur les 300 km de linéaire du Rhône modélisé. Le modèle met quatre jours pour transiter de Pougny à Miribel-Jonage

On observe que la concentration passe de 20 g/l à son maximum à la frontière Suisse à 4g/l environ au niveau de l'Isère. La concentration est donc divisée par 5 sur les 300 km parcourus. Comme vu précédemment, cette diminution de la concentration le long du bief reste cependant fortement sous-estimée.

On voit aussi l'important effet de dilution par les affluents :

- de l'Ain (courbe bleue),
- de la Saône (courbe jaune),
- sans compter les nombreux apports latéraux des petits affluents qui participent aussi à la diminution de la concentration de long du Rhône.

À la vue des résultats du graphique 40, l'hypothèse faite de considérer la concentration de la Saône nulle est vérifiée. En effet lors du pic de MES, à l'amont de la confluence avec la Saône la concentration en MES du Rhône est de 4 g/l environ à l'aval de la confluence lors du pic de MES. La concentration en MES de la Saône étant en temps normal d'environ 0,02-0,03 g/l, elle est donc largement négligeable face à celle du Rhône lorsqu'il s'agit d'étudier la propagation d'un pic de concentration en MES d'une telle intensité.

La zone de Miribel Jonage a un impact sur le temps de propagation (ralentissement) mais finalement peu dans l'écrêtement, comme on aurait pu le penser. Son influence sur le pic de MES est donc moins importante que la dilution par les affluents.

Nous nous sommes ensuite penchés plus en détail sur l'impact des aménagements « fermés » sur l'écoulement et le transport de MES, du point de vue du temps de propagation et du point de vue de l'écrêtement, comme on va le voir Figures 41 et 42 et dans le paragraphe ci dessous.

- Propagation des pics de concentration au niveau des aménagements hydrauliques.

La Figure 41 représente le pic de MES à l'amont, à l'aval et à travers un aménagement hydraulique type. La courbe jaune (Vieux-Rhône) n'apparaît pas sur le graphique car elle est confondue avec la courbe rouge du Rhône aménagé. Entre l'amont de l'aménagement hydraulique (courbe verte) et l'aval (courbe bleue foncée) on observe tout de même :

- un écrêtement du pic de concentration : baisse de la concentration d'environ 2g/L,
- un très léger décalage dans le temps : quelques heures pour 10 km de linéaire,
- par contre le profil du pic de concentration reste identique.

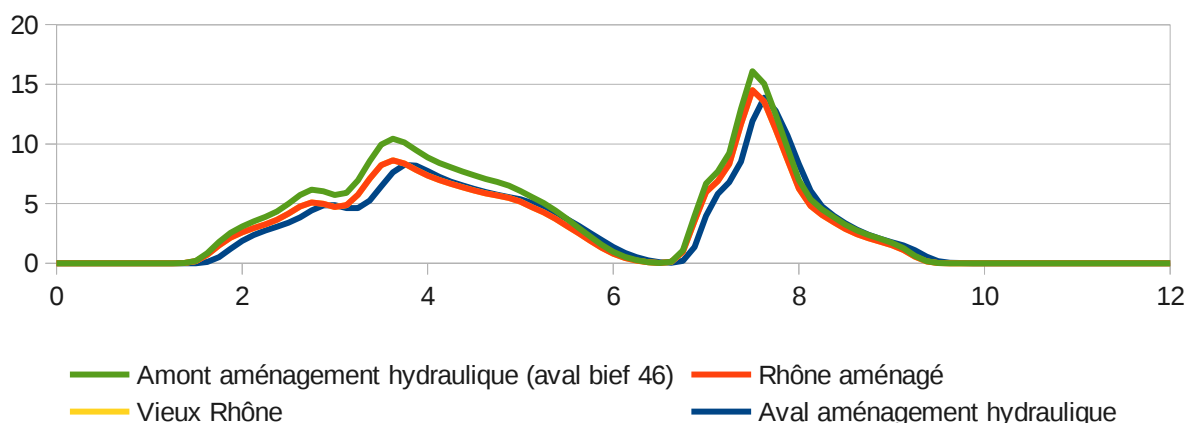


Figure 41: Propagation au sein d'un aménagement classique du Rhône.

Nous avons ensuite observé l'impact d'un barrage-usine sur la concentration. Comme on peut le voir sur la Figure 42 le bief 46 (deuxième bief le plus à l'amont), qui s'étend sur 40 Km et qui comporte les retenues de Génissiat et Seyssel (Barrages-usines), a une influence beaucoup plus importante que celle de l'aménagement type :

- sur le décalage temporel : 1,5 jours environ pour 40 km de linéaire.
- mais n'écrête pas plus le pic de concentration que l'aménagement hydraulique classique : environ 2g/L également.

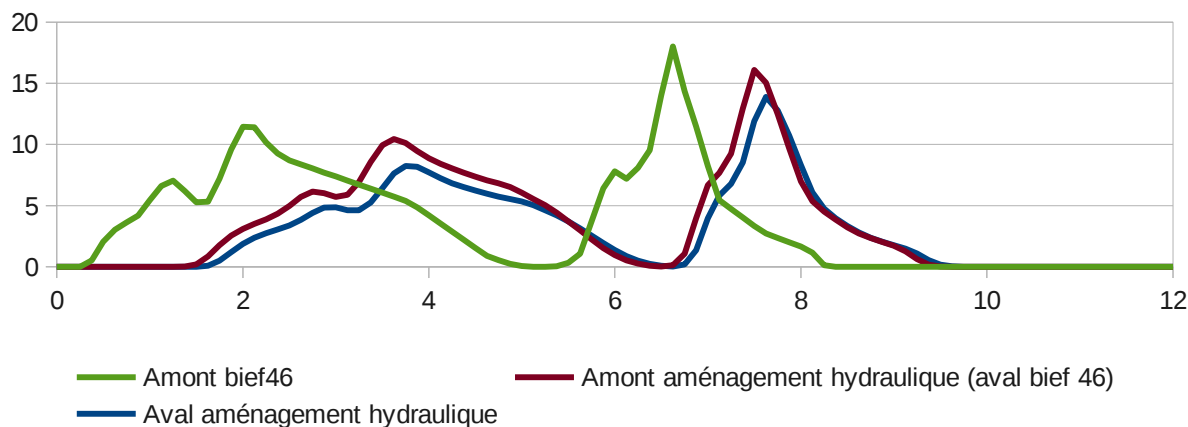


Figure 42: Influence sur la concentration en MES des barrages et aménagements hydrauliques, lors d'une chasse.

L'impact d'un barrage-usine aux vannes fermées sur le transport de MES est donc largement plus important que celui d'un « aménagement classique » du Rhône aux vannes également fermées. On en conclut donc que notre modèle est essentiellement faussé par les barrages-usines fermés de l'amont plus que par les « aménagements types » fermés du Rhône. Ce qui recoupe les résultats de la partie précédente qui montrent un fort ralentissement à Seyssel dans le transport sédimentaire (Figure 38). De plus, lors de la chasse les aménagements classiques du Rhône ne peuvent pas fonctionner toutes vannes ouvertes puisque le débit d'équipement du canal du Rhône aménagé reste obligatoire à respecter (sous peine d'endommager l'usine hydraulique).

Ces divers résultats montrent l'importance de la prise en compte des consignes d'exploitation dans le modèle et l'importance que jouent les barrages sur le stockage de sédiments. Il conviendra donc pour simuler une chasse ou une forte crue « d'effacer » (hydrauliquement parlant) les barrages du modèle pour obtenir le cas présenté Figure 14.

Malgré toutes les imperfections, grâce à la modélisation et aux logiciels de calculs hydrauliques et sédimentaires, il est possible de :

- estimer le temps d'arrivée d'un pic de concentration en MES ou encore d'un pic de pollution,
- prévoir les lieux de dépôt des MES,
- se préparer en conséquence.

Le dernier grand intérêt de cette modélisation et de ces logiciels hydro-sédimentaires, est de permettre de simuler ces événements sur de longues distances et de longues durées pour un temps de calcul limité : 30 minutes environ pour cette simulation hydraulique et sédimentaire pour deux polluants.

Cette simulation nous donne donc des informations intéressantes, cependant les limites du modèle avec la modélisation erronée des barrages dans le cas d'une chasse ou de fortes crues ne permet pas d'obtenir des résultats précis dans ces cas là.

11 CONCLUSIONS

11.1 CONCLUSION SUR LE NOUVEAU LOGICIEL DE TRANSPORT DE SÉDIMENTS, *ADIS-TS*

Les modèles d'hydraulique 1D Mage et de transport de sédiment Adis-TS répondent donc à la demande d'une résolution rapide et permettent de simuler des événements de longue durée sur de longues distances.

Dans notre étude nous nous sommes basés sur le logiciel hydraulique Mage, développé par Irstea, auquel nous avons couplé le logiciel de transport de sédiments Adis-TS. Mais il est possible d'utiliser Adis-TS couplé avec un autre logiciel hydraulique de son choix.

11.2 CONCLUSION SUR LE MODÈLE DU RHÔNE AMONT

Les principales conclusions qui ressortent de différentes simulations effectuées sur le transport de sédiments dans le Rhône sont :

- Trois zones de dépôt ont été identifiées dans toutes les simulations : Miribel-Jonage (site pilote, voir Andries et al., 2012, pour plus de détails), les lônes (voir Camenen et al., 2012, pour plus de détails sur la lône du Beurre) et les Vieux-Rhône des 3 aménagements hydrauliques les plus à l'aval de notre modèle. Mais il faut savoir que d'autres zones similaires aux lônes existent mais n'ont pas été modélisées faute d'informations. Ces zones devraient être également des zones de fort dépôt. Il y a donc potentiellement d'autres zones de dépôt important sur le Rhône qu'il serait intéressant de modéliser ultérieurement.
- Le suivi des pics de concentration en MES lors de la simulation de la chasse de 2003 nous apporte des informations sur le temps de transit des MES ainsi que sur la concentration et l'effet des dilutions par les affluents.
- La non-prise en compte actuelle d'une mise en transparence de certains ouvrages lors de chasses ou crues induit des erreurs importantes sur la modélisation hydraulique et donc sur l'advection-dispersion des MES.

11.3 PERSPECTIVES

11.3.1 AMÉLIORATION DU MODÈLE

Modéliser le Rhône français est une tâche de grande envergure qui peut se prolonger encore sur plusieurs années et sur plusieurs projets. Voici les améliorations et compléments possibles à apporter (ou déjà prévus) au modèle, à la suite de ce projet Axelera :

- Dans un premier temps il s'avère nécessaire de travailler à l'amélioration de la modélisation des barrages et usines en temps de crue et/ou de chasse. Pour cela, il nous faudra récupérer l'ensemble des informations (consignes d'exploitations) auprès de la CNR concernant les 19 ouvrages sur le Rhône (les données pour 4 ouvrages seulement ont été recueillies à ce jour). Puis il s'agira d'éditer des règles de régulations des débits et des ouvrages qui permettent de respecter à la fois les débits réservés et débits d'ouvrages ainsi que les consignes d'exploitations. Enfin, une solution alternative, en attendant de récupérer les informations et la mise au point de ses règles de régulations, consiste à effacer ponctuellement les barrages et usines de manière manuelle lors d'une simulation spécifique d'une chasse ou d'une crue.

Bien sûr cette dernière solution ne permet pas de simulation sur de longues périodes alternant étiage, crue et débit moyen, puisque l'effacement des barrages se fait manuellement.

- Dans le cadre d'un projet OSR, la modélisation va être poursuivie jusqu'à la mer d'ici l'automne 2012.
- Dans un avenir plus lointain, et toujours dans le cadre d'un projet OSR, le modèle du Rhône, étendu jusqu'à la mer, servira pour la simulation du transport de particules polluées au mercure.
- Il serait bien d'étendre le modèle également vers l'amont sur le Rhône suisse jusqu'au lac Léman pour intégrer la zone de confluence avec l'Arve. Irstea travaille actuellement à récupérer les données topographiques nécessaires.
- Une autre perspective à ce modèle serait de le compléter en ajoutant la topographie d'autres affluents (sur le même principe que l'Ain et la Saône) comme l'Arve, qui est un des principaux apports de MES au Rhône, l'Isère ou encore l'Ardèche, etc...
- Il est également possible d'affiner le modèle déjà existant, en créant par exemple de nouveaux nœuds (et donc en divisant certains biefs en plusieurs parties) pour pouvoir intégrer les affluents exactement au Pk où ils rejoignent le Rhône et non au nœud le plus proche comme actuellement.
- Enfin, il serait opportun pour compléter le suivi des MES dans le Rhône, d'ajouter d'autres zones sensibles comme les îles qui sont recensées en nombre le long du Rhône. Le travail est d'ailleurs déjà commencé sur une zone (table ronde) et peut être étendu à d'autres.

11.3.2 AMÉLIORATIONS HYDRAULIQUES

Du point de vue hydraulique, nous avons un modèle qui respecte au mieux les différents fonctionnements du Rhône. Cependant il est possible d'y apporter des améliorations concernant :

- Les consignes d'exploitation : elles sont pour le moment respectées « au mieux » (un équilibre est trouvé entre les consignes d'exploitation et les débits réservés à respecter) mais une des perspectives d'amélioration serait d'appliquer exactement les consignes d'exploitation.
- Les lignes d'eau : il reste à caler le modèle obtenu sur le maximum de lignes d'eau possible dans le maximum de lieux possibles. Pour l'instant le travail a été effectué en certains secteurs, mais il reste à le généraliser à tout le Rhône, après avoir effectué un travail, non négligeable, de récupération de données sur les lignes d'eau existantes.
- Les coefficients de Strickler : une partie des coefficients de Strickler choisis sur le modèle du Rhône n'ont pu être vérifiés sur le terrain ou par des données sûres. Il s'agit donc de déterminer la valeur du coefficient sur les tronçons en fonction des matériaux constituant le lit et les berges.

11.3.3 AMÉLIORATIONS SÉDIMENTAIRES

Les simulations sédimentaires ont été faites à partir d'un jeu de données issu de la zone de Miribel Jonage. Pour affiner le travail de simulation sédimentaire il faudrait :

- Améliorer les connaissances qualitatives (composition des MES de la Saône, granulométrie, etc...) et quantitatives (concentration) sur les sédiments du Rhône et de ses affluents.

- Pour cela, un travail de collecte de données est nécessaire car actuellement il existe peu de données, car peu de suivi et peu de stations de mesures des MES. Certaines se mettent en place mais la donnée est encore récente et ne permet pas encore de déterminer de tendances ou d'informations globales.
- Il est donc primordial pour améliorer la simulation hydro-sédimentaire sur le Rhône de continuer la mise en place du suivi des sédiments sur le Rhône, l'Arve, la Saône et d'en mettre en place sur d'autres cours d'eau.
- Pour continuer le développement et améliorer le logiciel Adis-Ts, un important travail de calage sur les mesures effectuées lors de la chasse 2012 sera nécessaire.
- D'un point de vue calcul, au vu des résultats sur la concentration il s'avère nécessaire d'apporter des améliorations sur la loi de dépôt érosion utilisée dans Adis-TS. Mais toute modification doit être faite en veillant à rester rapide dans les temps de calcul puisque c'est le but du modèle.

12 RÉFÉRENCES

- Andries, E. Le Coz, J. Faure, J.B. Camenen, B. & Launay, M. (2011). Impact of dam flushes on bed clogging in a secondary channel of the Rhône river. RCEM conference, Pékin, Chine, CDRom, 8 pages.
- Andries, E. Faure, J.B. Camenen, B. (2012). Modélisation hydro-sédimentaire du site de Miribel-Jonage à l'aide des modèles numériques Mage et Adis-TS. Rapport Axelera
- Burgeap (2011). Étude préalable aux opérations de chasses hydrauliques du Rhône amont – Analyse des échanges Rhône-nappe. Rapport technique 15, pp. 1-5.
- Bravard J.-P. & Clément A. (2008) Le Rhône en 100 questions. ZABR (Zone Atelier du Bassin du Rhône), 295, pp. 84-85.
- Camenen B. (2011). Parametrization of the source terms in an advection diffusion model. Document non publié, 6 pages.
- Camenen B. (2007). A simple and general formula for the settling velocity of particles in suspension. *J. Hydraulic Eng*, 133(2), pp. 229-233.
- Camenen, B., Andries, E., Faure, J.B., de Linares, M., Gandilhon F. & Raccasi G. (2012). Etude des transferts de sédiments fins dans le système Rhône : L'île du Beurre. Rapport Axelera
- CNR. (2010). Mesures d'accompagnement des chasses suisses 2012 : Notice technique de la consigne générale d'exploitation des ouvrages CNR. DR-B 10-1282a, LYON.
- CNR. (2009). Opérations d'accompagnement sur les aménagements CNR du haut-Rhône des chasses suisses de Verbois. Rapport technique, 48, pp.24-30.
- CNR. (2000). Opérations d'accompagnement sur les aménagements français du Haut-Rhône des chasses de la retenue de Verbois : campagne 2003. rapport de synthèse, LYON.
- CNR. (2000). Opérations d'accompagnement sur les aménagements français du Haut-Rhône des chasses de la retenue de Verbois : campagne 2000. rapport de synthèse, LYON.
- CNR. (1997). Chasses franco-suissees du Haut-Rhône : campagne 1997. rapport de synthèse, LYON.
- Degoutte, G. (2006). Diagnostique, aménagement et gestion des rivières – hydraulique et morphologie fluviales appliquées. Edition Tec et Doc, Lavoisier.
- Elder, J. (1959). The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow, *J. Fluid Mechanics* 5(4), 544–560.
- Faure J.-B. (2009). Résolution des équations de Barré de Saint-Venant 1D en réseaux complexes. Rapport Technique, 190, pp. 9-10.
- Fisher, H. B. (1967). The mechanics of dispersion in natural streams, *J. Hydraulic Division* 93(6), 187–216.
- Giraud, F. M., Faure, J.B., Zimmer, D., Lefeuvre, J.C. & Skaggs, R.W. (1997). Hydrologic modeling of a complex wetland, *J. Irrigation and Drainage Eng.* 123 : 5, 344-353.
- Iwasa, Y. & Aya, S. (1991). Predicting longitudinal dispersion coefficient in open-channel flows, dans 'Int. Symp. on Environmental Hydraulics', IAHR, Hong Kong, pp. 505-510.
- Hydratec, Sogreah, Minéa (2001). Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône : Étude du transport solide (Synthèse de première étape). Rapport technique, IRS.
- Launay, M., Le Coz J., Angot H., Dramais G., (2012). Traçage à la rhodamine WT pour étudier l'advection et la diffusion d'un polluant dans le Rhône à Miribel-Jonage. Rapport non publié, Irstea.
- Nicollet G. & Uan M. (1979). Écoulements permanents à surface libre en lits composés. *La Houille Blanche* (1):21-30

- SIG Énergies Production Électrique (2009). Barrage de Verbois, chasse 2010. Dossier de demande d'autorisation. Rapport technique, 75, pp. 22-33.
- Simon, L. (1995). Contribution à la modélisation numérique du transport de polluants en rivière. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussée, Paris.
- Sogréah (2000). Étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône : Étude du transport solide (Diagnostic de l'état actuel, calculs de transport solide). Rapport technique, IRS.
- Souhar O. & Faure J.-B., (2009). Approach for uncertainty propagation and design in Saint-Venant equations via automatic sensitive derivatives applied to Saar river. *Can. J. Civ. Eng.* Vol. 36, p. 1144–1154.
- Souhar, O. & Faure, J.B. (2010). Automatic differentiation strategy for the local sensitivity analysis of a one-dimensional hydraulic model. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 16 p.
- Soulsby R. (1997). Dynamics of marine sands, a manual for practical applications. Thomas Telford, London, UK. ISBN 0-7277-2584 X.
- Tanguy J.-M. (2010). Environmental Hydraulics Modeling Software, ISTE and Wiley, ; Vol. 5, chapters 16, 19 and 21.
- Ternat F., Boyer P., Anselmet F. & Amielh M. (2008). Erosion threshold of saturated natural cohesive sediments : Modeling and experiments, *Water Resources Res.* 44(W11434), 1-18.
- Wolf M. (2011) Évaluation de la modélisation 1D pour rendre compte d'une chasse de la retenue de Génissiat. Rapport de fin d'étude Polytech Paris UMPC, Cemagref, CNR.

13 ANNEXES

13.1 COEFFICIENTS DE STRICKLER UTILISÉS SUR L'ENSEMBLE DU MODÈLE

Les coefficients de Strickler (lit mineur et lit moyen) utilisés pour chaque bief et différents PK sont présentés dans le tableau 12. Il est à noter que plusieurs couples de coefficients de Strickler ont parfois été utilisés pour un unique bief. La convention pour la numérotation des PK est basée sur la convention de la CNR, soit un PK nul à Lyon. Les PK sont ensuite comptés positivement vers l'aval. Pour les affluents (Ain, Saône), les PK sont comptés croissant avec un PK nul à la confluence.

Tableau 12: Coefficients de Strickler utilisés en fonction des pk et des biefs

Bief	PK début (km)	PK fin (km)	Strickler lit mineur (m ^{1/3} /s)	Strickler lit moyen (m ^{1/3} /s)
RHONE GEV FRO	-208,000	-186,420	24,0	18,0
RHONE FRO MTZ	-186,420	-148,050	24,0	18,0
RHONE AMENAGE MTZ CLZ	-145,450	-137,610	28,0	18,0
VIEUX RHONE MTZ CLZ	-146,000	-136,985	22,0	18,0
RHONE CLZ LAV	-136,650	-131,800	22,0	18,0
RHONE AMENAGE LAV BRE	-131,600	-117,175	28,0	18,0
VIEUX RHONE LAV BRE	-131,650	-114,640	22,0	18,0
RHONE BRE BCO	-114,540	-103,100	22,0	18,0
RHONE AMENAGE BCO EVI	-103,000	-95,650	28,0	18,0
VIEUX RHONE BCO EVI	-102,950	-91,750	22,0	18,0
RHONE EVI VLB	-91,550	-63,700	22,0	18,0
RHONE AMENAGE VLB SBR	-63,540	-62,145	28,0	18,0
VIEUX RHONE VLB SBR	-63,600	-62,000	22,0	18,0
RHONE SBR ANT	-61,820	-35,000	22,0	18,0
AIN	-11,850	-0,220	25,0	18,0
RHONE ANT JNS	-34,000	-26,850	27,0	18,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-26,750	-25400	28,0	28,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-25,400	-25,200	20,0	28,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-25,200	-24,900	20,0,	25,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-24,900	-24,600	22,0,	15,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-24,600	-24,200	18,0	15,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-24,200	-23,700	13,0	13,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-23,700	-23,350	20,0	15,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-23,350	-22,700	13,0	22,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-22,700	-22,500	13,0	25,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-22,500	-22,000	30,0,	28,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-22,000	-19600	25,0	25,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-19,600	-19,200	28,0	25,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-19,200	-18,600	30,0	25,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-18,600	-18,400	28,0	25,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-18,400	-18,200	24,0	20,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-18,200	-17,800	22,0	20,0

Bief	PK début (km)	PK fin (km)	Strickler lit mineur (m ^{1/3} /s)	Strickler lit moyen (m ^{1/3} /s)
CANAL MIRIBEL AMONT	-17,800	-15,800	30,0	28,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-15,800	-15,000	28,0	28,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-15,000	-14,000	25,0	28,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-14,000	-13,400	25,0	13,0
CANAL MIRIBEL AMONT	-13,400	-13,000	13,0	13,0
CANAL MIRIBEL AVAL	-13,000	-12,200	13,0	13,0
CANAL MIRIBEL AVAL	-12,200	-11,600	13,0	15,0
CANAL MIRIBEL AVAL	-11,600	-11,300	15,0	15,0
CANAL MIRIBEL AVAL	-11,300	-10,000	18,0	18,0
CANAL MIRIBEL AVAL	-10,000	-9,000	18,0	20,0
CANAL JONAGE AMONT	0,000	18,700	20,0	20,0
CANAL JONAGE AVAL	3,750	4,750	24,0	24,0
VIEUX RHONE AMONT (BRECHE CASIER)	0,000	0,450	18,0	18,0
VIEUX RHONE AMONT (CASIER CANAL SUD)	0,720	0,860	18,0	18,0
CANAL SUD	0,000	2,767	30,0	30,0
VIEUX RHONE (// CANAL SUD)	0,000	3,350	26,0	26,0
VIEUX RHONE AVAL	3350	3,720	25,0	25,0
RHONE SEUIL BPN	0,000	0,300	25,0	25,0
RHONE LYON	0,000	8,860	30,0	30,0
SAONE	-4,400	-0,460	30,0	15,0
RHONE PRH POR	1,000	3,300	30,0	15,0
RHONE POR PIB	3,300	3,800	30,0	15,0
RHONE AMENAGE PIB TRN	3,900	14,500	30,0	15,0
VIEUX RHONE PIB TRN	3,800	14,500	30,0	15,0
RHONE TRN VAU	14,900	29,500	30,0	15,0
RHONE VAU CHA	29,500	36,500	30,0	15,0
RHONE // CHEVRE	36,500	37,584	30,0	15,0
RHONE // BEURRE	37,666	38,334	30,0	15,0
LONE CHEVRE 2009	0,000	1,810	10,0	15,0
LONE BEURRE 2009	0,000	0,306	10,0	15,0
LONE COMMUNE 2009	0,361	0,856	10,0	15,0
RHONE BAV SPB	38,500	50,800	30,0	15,0
RHONE AMENAGE SPB SRA	50,900	63,000	30,0	15,0
VIEUX RHONE SPB SRA	50,920	63,500	30,0	15,0
RHONE SRA CHP	63,500	67,000	30,0	15,0
RHONE CHP ARA	67,500	82,700	30,0	15,0
RHONE AMENAGE ARA GRV	83,000	86,000	30,0	15,0
VIEUX RHONE ARA GRV	82,800	85,520	30,0	15,0
RHONE GRV GLU	85,950	98,200	30,0	15,0